



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

PROTOTYP ZAŘÍZENÍ PRO RECYKLACI FILAMENTU

PROTOTYPE OF A FILAMENT RECYCLING PLANT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lukáš Tatýrek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav automatizace a informatiky
Student: **Bc. Lukáš Tatýrek**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Aplikovaná informatika a řízení
Vedoucí práce: **doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Prototyp zařízení pro recyklaci filamentu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Snižování cen 3D tiskáren a jejich rozšiřování v domácím prostředí je současným trendem, negativní stránkou je však nárůst odpadu, který nejde recyklovat. Výtisky na sobě nemají recyklační symbol a nemůžou být recyklovány klasickou cestou. Přestože se některé materiály označují jako biologicky odbouratelné (například PLA), je toto podmíněno použitím speciální technologií. Cílem této práce bude realizace prototypu recyklačního zařízení pro filament, tj. realizace extruderu a navijáku filamentu.

Cíle diplomové práce:

- 1/ Rešerše výroby a materiálů filamentů.
- 2/ Rešerše možností recyklace odpadů z 3D tisku.
- 3/ Konstrukční návrh a realizace extruderu filamentu.
- 4/ Konstrukční návrh a realizace navijáč filamentu.
- 5/ Vyhodnocení kvality vytvořeného filamentu – měření, mechanické vlastnosti, tisk.
- 6/ Vytvoření demonstračního videa a poster k prototypu.

Seznam doporučené literatury:

REDWOOD, Ben, Filemon SCHÖFFER a Brian GARRET, [2017]. The 3D printing handbook: technologies, design and applications. Amsterdam: 3D Hubs. ISBN 978-90-827485-0-5.

HARPER, C.A., [2000]. Modern Plastics Handbook. McGraw-Hill handbooks. ISBN 978-00-702671-45.

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá recyklací odpadů z FDM tisků. Cílem bylo navrhnout a postavit sestavu extruderu a navíječe filamentu pro 3D tiskárny. Návrh vycházel především z rešerše dostupných komerčních a OpenSource řešení. Výsledkem je fungující stroj s kompaktním půdorysem, schopný vyprodukovat 110 gramů za hodinu s odhcytkou od průměru $\pm 0,07mm$. V závěru je kladen důraz na další vylepšování a testování, protože ještě nebylo dosaženo limitů stroje.

ABSTRACT

Master thesis is focusing on possibility of recycling waste from 3D prints. Goal was to design and make filament extruder and winder. Design is based on research of available commercial and OpenSource solutions. The result is working machine with compact floor projection, which is able to produce 110 grams of filament per hour. Deviation from diameter was $\pm 0,07mm$. Conclusion places great emphasis on further improving and testing, because it has not reached limits of machine.

KLÍČOVÁ SLOVA

extruder filamentu, recyklace 3D tisků, navíječ filamentu, upcyclage plastů

KEYWORDS

filament extruder, recyclation of 3D prints, filament winder, plastic upcycling



ÚSTAV AUTOMATIZACE
A INFORMATIKY



2021

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TATÝREK, Lukáš. *Prototyp zařízení pro recyklaci filamentu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky, 2021, 99 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato diplomová práce je mým původním dílem, vypracoval jsem ji samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury.

Jako autor uvedené práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků.

V Brně dne 21. 5. 2021

.....

Lukáš Tatýrek

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji všem, kteří vyvinuli šablonu pro L^AT_EX. Neskutečně mi usnadnila tvorbu této práce.

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....	17
2.1	Historie	17
2.1.1	RepRap	17
2.1.2	Současnost	18
2.2	Tiskové materiály	19
2.2.1	PLA	19
2.2.2	ABS	19
2.2.3	ASA a ASA275	20
2.2.4	PET a PETG	20
2.2.5	Ostatní	21
2.3	Recyklace běžných plastů	21
2.3.1	Svoz	21
2.3.2	Třídění	22
2.3.3	Recyklace	22
2.4	Jak vzniká odpad u 3D tisku	23
2.5	Recyklace 3D tisků	24
2.5.1	Projekt Precius Plastic	25
2.5.2	Recyklovaný filament	25
2.6	Výzvy recyklace 3D tisku	26
2.6.1	Čistota a třídění vstupní suroviny	26
2.6.2	Drcení	27
2.6.3	Extruze	30
2.6.4	Filament	37
3	VLASTNÍ ŘEŠENÍ	41
3.1	Návrh	41
3.1.1	Extruder	41
3.1.2	Navíječ	44
3.1.3	Senzor průměru	47
3.1.4	Řízení	49
3.2	Výroba	52
3.2.1	Ovládací panel	52
3.3	Výroba filamentu	54
3.3.1	Kde koupit granulát	54
3.3.2	Vlastní výroba	55
3.4	Měření	55
3.4.1	Průměr a teplota	55

3.4.2	Tisk	58
3.4.3	Spotřeba a produkce	59
3.5	Seznam dílů a cen	60
4	ZHODNOCENÍ a DISKUZE	65
4.0.1	Problémy	65
4.1	Technické parametry stroje	65
4.1.1	Srovnání s jinými stroji	65
4.1.2	Ekonomická návratnost	66
4.2	Možnost další práce	67
5	ZÁVĚR	69
6	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	71
8	SEZNAM OBRÁZKŮ	77
9	SEZNAM TABULEK	79
7	SEZNAM PŘÍLOH	81
A	Výkres HotEnd	83
B	Kód Arduino MEGA	85
C	Kód Arduino UNO	95

1 ÚVOD

Se zlevňováním a rozšiřováním tiskáren do domácího prostředí vzniká stále více odpadu, který nejde recyklovat. Výtisky na sobě nemají recyklační symbol a nemůžou být recyklovány klasickou cestou. Přestože se některé materiály označují jako biologicky odbouratelné (například PLA), je to podmíněno použitím speciálních technologií, například průmyslových kompostérů s teplotou kolem 60 °C a speciálními mikroorganismy, a i poté tento proces trvá u menších tisků několik měsíců. Tyto problémy spolu s ekonomickým tlakem, který vyvábí zvyšující se cena za špulku filamentu, začínají vytvářet prostor pro recyklaci 3D tisků, který by byl nejen ekologický, ale i ekonomicky výhodný. Prvním krokem k úspěšné recyklaci je výroba z průmyslového granulátu. Pokud je zvládnuta, může se pokročit k dalšímu kroku drcení a následně reextruze nového filamentu.

Práce je rozdělena na dvě hlavní části. První část se věnuje rešerši oblastí užitečných pro vlastní návrh, kterou se zabývá druhá část. Prochází obecnou historií 3D tisku a vlastnosti běžně používaných materiálů. Zabývá se systémem recyklace běžných plastů a způsobem vzniku odpadů u 3D tisku. Zmiňuje některé komerční projekty, které se zabývají recyklací plastových odpadů na filament a popisuje oblasti, které je potřeba zvládnout, aby bylo možné z 3D tiskového odpadu vyrábět nový filament. V oblasti drcení a extruze prochází komerční a OpenSource řešení.

Dále je popsán návrh jednotlivých částí stroje. Na extruderu je to výběr topného tělesa, alternativy šnekového podavače, pohonu a návrh vlastního hotendu. Prochází několik etap vývoje navíjecí sestavy a jejího vlivu na podobu celého stroje. Popisuje systém navíjení cívky a usměrnění filamentu pomocí průvlaku. Samostatná část je věnována měření průměru filamentu, které probíhá pomocí převzatého řešení InFiDEL. Následuje popis řízení stroje dvěma vývojovými deskami Arduino MEGA a UNO.

Samotná část výroby je rozdělena na konstrukci a ovládací panel s návodem pro ovládání. Následně se zabývá výrobou filamentu na zařízení a měřením parametrů stroje. Kapitola je uzavřena seznamem dílů a cen jednotlivých částí.

Práce je uzavřena zhodnocením vlastního řešení, porovnáním se dříve zmíněnými stroji a modelem ekonomické návratnosti. V úplném závěru je zmíněn směr, kterým by se měl ubírat další vývoj na tomto zařízení.

Jako nadšený tiskař jsem za necelé dva roky co vlastním FDM tiskárny nashromáždil několik kg nepovedených tisků. Vedla mě k tomu naděje, že je jednou bude možné zrecyklovat, ať už v rámci komunity nebo nějaké firmy. Tato práce je prvním krokem pro její naplnění.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Historie

První 3D tiskárna, obr. 1, byla sestrojena v roce 1983. Tiskárna fungovala na principu Stereolitografie a v roce 1986 byl na tuto technologii udělen patent [1]. V roce 1988 byla následována patentem technologie FDM firmou Stratasys. První FDM tiskárna, na obr. 1 vpravo, byla uvedena do prodeje až v roce 1991. Následovalo období, ve kterém firmu držící patenty vydávaly vylepšené modely a umožňovaly vybraným firmám za licenční poplatky vyrábět a prodávat stroje pracující na jimi patentovaných technologiích. Toto vedlo, k vytvoření dominantních až monopolních firem. Bez konkurenčního tlaku byl vývoj technologií a zlevňování strojů velmi pozvolný.



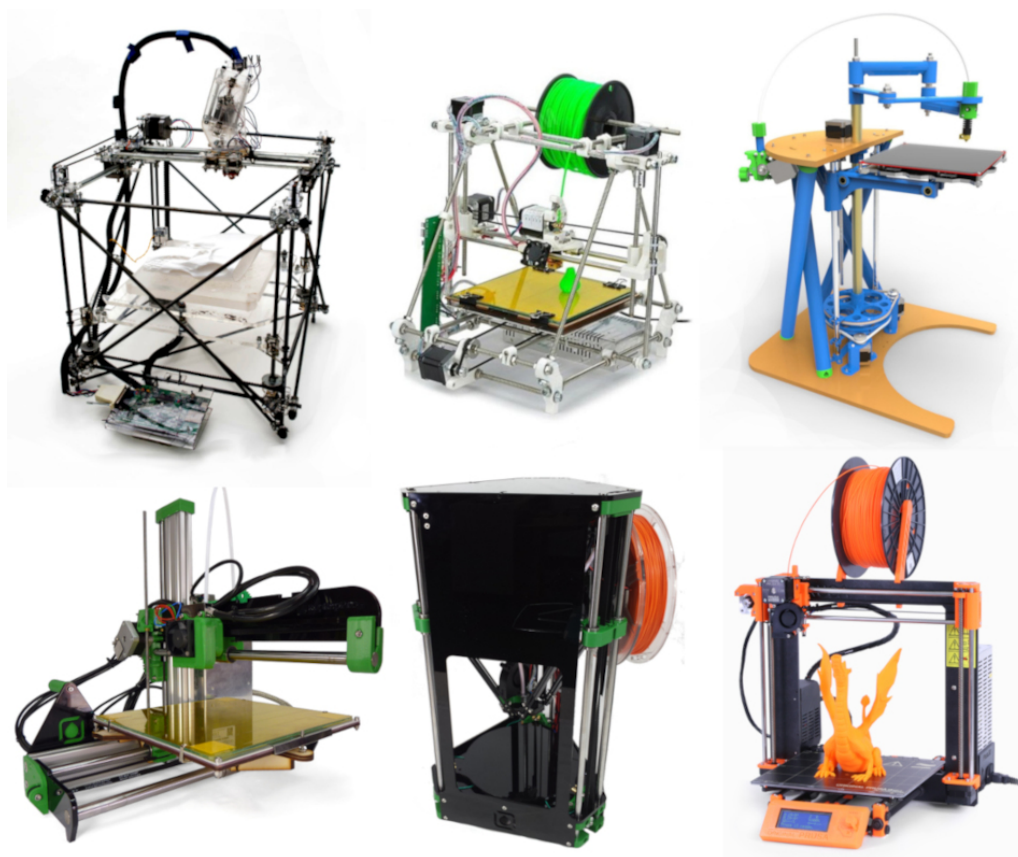
Obr. 1: První SLA tiskárna SLA-1 [2] a první FDM tiskárna Stratasys 3D Modeler [3].

2.1.1 RepRap

V roce 2005 založil Dr. Adrian Bowyer projekt RepRap¹ [4]. Hlavní myšlenkou bylo vytvořit stroj, který bude kopírovat sám sebe a mimo to bude schopen vyvážet užitečné výrobky. K popularizaci celého projektu vedlo jeho vydání pod licenci General

¹ Replicating Rapid Prototyper

Public Licence [5], tedy k možnosti šíření a upravování projektu pod podmínkou zachování stejné licence u upravených verzí. Toto umožnilo plně využít možností evoluce a šlechtění, kdy spolu soupeřilo, a dodnes soupeří, velké množství variant, které konstrukčně s původním návrhem² nemají na první pohled mnoho společného, jak jde vidět z obr. 2. Dalším velkým milníkem bylo ukončení trvání patentové ochrany v roce 2009, a tak se otevřely možnosti prodeje levných FDM tiskáren, které přinesly kapitál a umožnily urychlení vývoje a rapidní rozšíření mezi populaci. Dobrým příkladem je česká firma PrusaResearch, která vyvinula mnoho vylepšení a stala se symbolem vývoje 3D tiskáren.



Obr. 2: Evoluce 3D tiskáren RepRap: Darwin, Mendel v2, Morgan, Ormerod 2, Fisher Delta, Prusa i3 Mk2 [6].

2.1.2 Současnost

Konec patentové ochrany znamenal snížení ceny ze stovek tisíc na desítky tisíc a koupě 3D tiskárny se tak stala dostupná i pro obyčejné lidi, kteří z různých důvodů chtěli 3D tiskárnu jako hotový produkt. Díky licenci GPL bylo možné kopírovat a dále upravovat design, probíhal tak rychlý vývoj ve velmi silně konkurenčním prostředí a po vstupu čínských kopií na trh došlo k dalšímu poklesu ceny. V dnešní době

² Díly pro první kus byly vytištěny na první FDM tiskárně Statasys 3D Modeler.

lze zakoupit za jednotky tisíc uživatelsky velice přívětivý stroj, který po vyladění dosahuje kvalit srovnatelných s řádově dražšími modely. A to jak v technologii FDM, tak MSLA. s průběžným vyprcháním patentové ochrany bude docházet ke skokovému zlepšování tiskáren. Například v roce 2019 skončila ochrana uzavřených komor tiskového prostoru a tento rok již přichází první levné tiskárny s tímto vylepšením.

2.2 Tiskové materiály

Jednotlivé technologie 3D tisku používají různé materiály. Může se jednat o kovové a plastové prášky, photopolymery³, jíl, písek nebo pro nás důležité termoplasty používané u technologie FDM. z běžně rozšířených technologií lze recyklovat pouze materiály používané u FDM.

2.2.1 PLA

Neboli Polylactic acid. Z škrobu se enzymatickou hydrolyzou vyrábí glukóza, ze které se fermentací získá kyselina mléčná. Ta se musí polymerizovat na výsledný produkt. Jedná se o nejčastěji používaný materiál začátečníků především kvůli své nenáročnosti, kdy se díky nízké tepelné smrštlivosti během tisku nekrouť a dobře drží i na nevyhřívaných podložkách a tiskárnách bez vyhřívané komory. Tiskne se za nízkých teplot (cca 200 °C) a při tisku vzniká nasládlá vůně. PLA je tvrdý, křehký a jednoduše opracovatelný. Bývá označován jako biologický a biologicky odbouratelný materiál. Neznamena to však, že je možné ho kompostovat v domácích/přírodních podmínkách. Je biologicky rozložitelný pouze za průmyslových podmínek [7, 8] (při teplotách okolo 60 °C, zvýšené vlhkosti a za přítomnosti speciálních mikroorganismů stále trvá několik měsíců, než dojde k rozkladu)⁴. Bývá používáno v lékařských aplikacích jako chirurgicky vložené čepy, tyče, šrouby a mřížky. Není nutná další operace pro vyjmutí částí, lidské tělo je dokáže během šesti měsíců až dvou let plně vstřebat [9]. Další využití PLA mimo 3D tisk je v podobě obalů jídla, jednorázových přístrojů nebo plenek. Existuje projekt, který úspěšně recykloval použité kelímky na pití na filament [10]. Je vhodný především na tisk dekoračních předmětů, modelů a méně namáhaných součástí, které nejsou vystaveny teple. Není vhodný pro trvalé zatížení kvůli creepu [11].

2.2.2 ABS

Akrylonitrilbutadienstyren byl jeden z prvních materiálů. Který se používal k 3D tisku. V současnosti je vyhledávaný kvůli svým vlastnostem, díky kterým je vhodný

³ Pryskyřice, které se vytvrzují působením světla.

⁴ Stejný případ je i airsoftové střelivo, které se často pyšní nápisy BIO a BIODEGRADABLE, střelivo je ale vyrobeno z prášku PLA a lepidla. Samovolný rozklad v přírodě tak trvá roky.

na funkční součásti. Je dostatečně tuhý, dobře odolává nárazům a vysokým teplotám do 100 °C. Toto je vykoupeno složitějším tiskem. Při tisku se kroutí a je proto potřeba tisknout v uzavřené komoře s vyhřívanou podložkou a i tak může být tisk větších objektů problematické. Tiskne se za vyšších teplot (cca 255 °C) a je vhodné použít celokovový heatbreak, aby nedocházelo k uvolňování neurotoxinu z PTFE trubičky [12]. Při tisku také dochází k uvolňování výparů styrénu. Je citlivý na UV světlo a proto je potřeba ho pro venkovní použití opatřit ochranou vrstvou. Velkou výhodou je možnost jednoduše vyhlazovat výtisky pomocí výparu acetonu. Díky tomu dojde ke slití exponovaných vrstev a vytvoří se hladký povrch. Mimo 3D tisk má široké uplatnění v automobilovém průmyslu, jsou z něj vyráběny LEGO kostičky, je používán na kuchyňské výrobky, hračky. Je vhodný především na tisk menších namáhaných součástí, dílů vystavených vyšším teplotám a na tisk produktů, u kterých je potřeba hladký povrch.

2.2.3 ASA a ASA275

Acrylonitrile styrene acrylate se začal používat jako náhrada/nástupce ABS. Přebírá všechny jeho dobré vlastnosti a přidává k nim odolnost vůči UV záření. Je však snížena odolnost vůči teplotám na 90 °C a kvůli obsahu styrénu zůstává problém s výpary, i když jsou řádově nižší než u ABS. Tuhost výtisků se naopak mírně zvýšila. Stejně je to se smršťováním, a tedy kroucením materiálu, které je lepší než u jeho předchůdce. Avšak u větších výtisků stále dochází ke kroucení a odlepování z podložky. Vyhřívaná podložka je nutností a tisk v uzavřeném boxu je doporučován, u menších a středních objektů jej lze nahradit vysokým skirtem. Zůstává vysoká teplota tisku, ale i možnost vyhlazovat acetonovými výpary. i ASA má svého nástupce v podobě upraveného materiálu ASA275, který se tiskovou náročností blíží PLA. Teploty tisku umožňují použít heatbreak s PTFE trubičkou a díky menšímu sklonu ke kroucení stačí i vyhřívaná podložka bez nutnosti uzavřeného boxu. Nevýhodou je snížení mechanické odolnosti, UV odolnost zůstává zachována. Je vhodný především na tisk, který bude vystaven UV záření a vyšším teplotám. ASA je velmi vhodná na díly, které budou dále obráběny.

2.2.4 PET a PETG

Nejpoužívanější plastový materiál Polyethylentereftalát. Jeví se jako materiál, který si bere dobré vlastnosti jak PLA, tak ABS. Má dokonce lepší mechanické vlastnosti než ABS, ale je více křehký. Velmi dobře odolává creepu, UV⁵, kyselinám a zásadám (kromě NaOH, KOH a HNO₃) a vysokým teplotám do 100 °C. Má nízké tendence

⁵ UV odolnost zajišťují příměsi těžkých kovů [13, 14], ty se v případě PET lahví s nápoji do nápojů postupně uvolňují. Proto můžete vidět na PET lahvích s vodou datum spotřeby, i když voda sama by se zkazit neměla. Jde o datum, do kdy se koncentrace těžkých kovů ve vodě a jiných nápojích pohybují pod zákonný limit.

ke kroucení a smršťování, je tedy vhodný i pro tisk velmi rozměrných objektů. Je potřeba vyhřívaná podložka a tiskne se za vysokých teplot (260 °C). Hlavním problémem je jeho silná hygroskopická vlastnost, a proto je nutné ho před každým tiskem vysušit, ideální je tisk přímo ze sušící komory. PET je nejznámější ve své formě PET lahví, ale používá se i jako obal jakýkoliv potravin, léků a dalších věcí, které slouží ke konzumaci. Již existuje více firem, které se věnují recyklaci PET lahví na filament, například b-bet [15]. Upravenou variantou je PETG, kde G znamená příměs Glykolu. Tím došlo ke snížení teploty tisku na 230 °C a nemusí se používat celokovový hotend. Přestože materiál zůstává hygroskopický, většinou ho již není potřeba vysušovat před tiskem, ale pouze v případě, že materiál zůstane delší dobu nepoužíván. Oproti PET má vyšší houževnatost, ale ostatní mechanické vlastnosti se mírně sníží, většinou však zůstanou nad úrovní ABS. Horší to je v případech vysokých teplot, kdy měkne už při 80 °C, tuhost a tvrdost jsou nižší jen nepatrně.

PET a PETG lze s výhodou použít na rozměrnější součásti odolné chemikáliím nebo vyšším teplotám a na funkční díly využívající houževnatosti materiálu.

2.2.5 Ostatní

Další, méně používané materiály jsou většinou dražší, náročnější na tisk nebo mají specifické využití. Může se jednat o již výše popsané materiály s méně častou úpravou složení, které zásadně ovlivňují vlastnosti materiálu. Například PLA-ST s vyšší pevností, PLA-HT s vyšší odolností vůči teplotám, PETT s příměsí Trimethylénu, který snižuje teplotu tisku oproti čistému PET, ale nezpůsobí snížení tuhosti jako PETG. Dále může být v materiálech použito nejrozumnější plnivo od třípytek a částec kovu přes dřevěné piliny po karbonové vlákna. Nebo zcela jiné materiály jako Polykarbonát, Nylon, Polypropylen, flexibilní materiály, materiály pro rozpustné podpěry jako PVA a BVOH. Samostatnou kapitolou jsou průmyslové materiály typu ULTEM a PEEK, které jsou tiskově mnohem složitější (tiskové teploty okolo 375 °C, nutnost vysoušení filamentu, vyhřívané komory atd.).

2.3 Recyklace běžných plastů

Pojem recyklace vychází z životního cyklu výrobku, kdy je výrobek na jeho konci zpracován a vrácen na začátek, ať už ve stejné nebo nové podobě.

2.3.1 Svoz

Většina recyklace plastů, ať už od domácností nebo firem, probíhá přes sběrné dvory, které plastový odpad sváží, třídí, někdy také čistí, ale především vytríděné plasty přeprodávají. Svoz pro domácnosti probíhá pomocí žlutých kontejnerů. Firmy, které

produkují větší množství čistých jednodruhových plastů, mají možnost přímo spolupracovat se sběrnými dvory, které od nich tento odpad vykupují [16].

2.3.2 Třídění

Cílem třídění plastů není jen rozpoznat a rozdělit plasty podle materiálu, ale i určení vhodnosti pro další zpracování. Samotnou výzvou je i rozpoznání jednotlivých materiálů. Většina výrobků z plastu má recyklační symbol, který obsahuje název materiálu, ze kterého je vyroben. Symbol slouží spíše jako pomocné vodítko, aby byli lidé informováni, jestli má smysl daný výrobek třídit, případně pro neautomatizované linky k ujištění obsluhy. Tím, že je většinou vyražen ve stejné barvě jako okolní materiál, nemá pevně dané umístění a v případě drcených/poškozených částí je využití symbolu na automatických linkách téměř nemožné. Automatické třídící linky využívají řadu technologií, většinou fungujících na principu IR záření a hustoty. Přestože odpad probíhá linkou vícenásobně je stále potřeba neautomatizovaný mezistupeň [17]. Třídění má své vlastní výzvy, které většinou souvisí s neinformovaností a nekázní výrobců odpadu, jednou z nich je zašpinění obalů potravin. Třídící a recyklační provozy vybízí lidi, aby se zamysleli nad ekologičností umývání obalů od potravin, kdy v některých případech může docházet k zřejmému plýtvání vodou a nadměrnému používání saponátu [18].

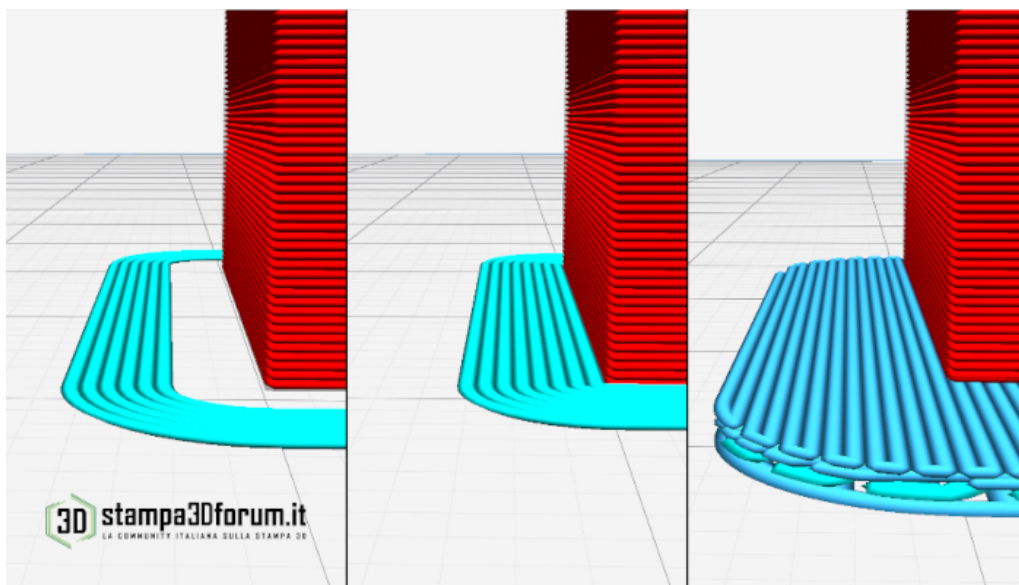
2.3.3 Recyklace

Plasty, které nejsou ekonomicky vhodné pro opakovanou recyklaci, jsou využity ve svém posledním cyklu ve spalovně, případně v chemických závodech na zpracování plastových odpadů, kde dochází k štěpení na nízkomolekulární řetězce. Příkladem může být pyrolýza, kdy za zvýšené teploty v prostředí bez kyslíku dochází ke štěpení plastů na složky podobné zemnímu plynu, lehkým topným olejům a uhlíku. u odpadů, které se vyplatí recyklovat, se po vytřídění musí odpad přetvořit do podoby vhodné pro další zpracování, nejčastěji do formy granulátu, ale může se také jednat o vločky, drť různé hrubosti a jiné. Z těchto základních forem odpadu může stále ještě v recyklačním závodu docházet k přepracování na hodnotnější polotovary ve formě desek, profilů, vláken a dalších podle schopností závodů a přání odběratelů. Zajímavý je také způsob, jak se určuje podíl recyklované části. Pokud se odpad zpracovává v rámci ČR, tak se vykazuje kolik procent z něj bylo uloženo na skládky, kolik spáleno a kolik odkoupeno k další recyklaci. V případě, že jiná země nakoupí odpad třeba ihned po svozu, je následně vykázan jako plně zrecyklovaný, bez ohledu na to, co se s ním ve skutečnosti děje. Toto není problém pouze ČR, ale celé Evropské unie a souvisí s přerozdělováním dotací podle podílu zrecyklované části. V roce 2017 došlo k zpřísnění legislativy v Číně ohledně dovozu odpadu. Pro lepší představu ještě v roce 2016 se 87 % plastu z Evropské unie dováželo do Číny [19, 20]. Dopad tohoto

zpřísnění lze dodnes pozorovat na zpracovných odpadu, kdy jen část měsíce dochází k třídění a koncentraci plastů pro další zpracování a naplnění odběrové kapacity, poté další třídění neprobíhá. Navíc se nejčastěji třídí pouze čisté PET lahve, PVC a polystyrén⁶ [21]

2.4 Jak vzniká odpad u 3D tisku

Přestože se jedná o technologii typu aditive manufacturing vzniká při tisku odpad, viz obr. 3, v podobě podpěr, raftu, skurtu, brimu a v případě multimateriálového tisku jednou hlavou i čistící věž. Podpěry slouží k tisku převisů a částí, které začí-



Obr. 3: Zleva Skirt, Brim a Raft [22].

nají nad úrovní tiskové podložky. Skirt vytvoří obrys objektu v určité vzdálenosti. Většinou se používá pouze jednovrstvý a slouží především pro očištění trysky a kontrole přilnavosti materiálu, ale může se použít i vícevrstvý, v takovém případě má nahradit vyhřívanou komoru. Omezuje případný průvan a díky rovnoměrnější teplotě pomáhá proti kroucení, odlepování od podložky a praskání vrstev u obtížněji tisknutelných materiálů jako je ABS. Brim je speciální verze skurtu, který ale není odsazen od tištěného objektu a přímo na něj navazuje. Cílem je zlepšit přilnavost tisku k podložce, zabránit kroucení a zvedání rohů. Je velmi vhodné jej použít u úzkých vysokých objektů, kde je vyšší riziko převržení. V případě raftu je objekt během slicování nadzvednut a pod ním se vytvoří podpůrný materiál. Tím se zlepší

⁶ Jedná se osobní zkušenost, mě a mých přátel, jednu zpracovnu odpadu mám v blízkosti bydliště a téměř denně kolem ní jezdím. Kamarád a jeho rodiče pracují na třídící lince na jiném provozu a mají stejnou zkušenost. Oba provozy se nachází ve Vsetínském okrese a pevně věřím, že jinde to funguje lépe.

přilnutí k podložce, zvětší se kontaktní plocha, vyrovnají se případné nerovnosti podložky a také pomáhá s kroucením tisků z ABS. Po ukončení tisku je potřeba všechny tyto části odstranit. Technologie spadá pod obor Rapid Prototyping, který umožňuje rychlý vývoj produktů. To je umožněno především levnou vícenásobnou iterací prototypů. Po zavedení výroby většinou výtisky nemají další využití a stávají se odpadem. Zmetky a výrobky na konci svého životního cyklu jsou dalším zřejmým zdrojem. Méně zřejmé je, co je konec životního cyklu výtisku. U funkčních dílů to může být jasné. Došlo k nadměrnému opotřebení, výrobek přestal plnit svou funkci nebo byl nahrazen lepším dílem. Mnoho domácích uživatelů tiskne věci jen tak pro radost, které navíc bývají sezonního charakteru a v dnešní konzumní společnosti končí jejich životní cyklus s koncem sezóny. Pokud nejsou přeprodány, což může být vzhledem k duševnímu vlastnictví často nelegální, nebo darovány, je jejich cyklus uzavřen.

2.5 Recyklace 3D tisků

Průmyslová recyklace tisků se zatím, minimálně v ČR, neprovádí. Nejpravděpodobnějším důvodem je absence odběratelů, ale i ekonomická stránka věci, kdy vytríděné PLA v kvalitě dostatečné pro recyklaci do filamentu, bude dražší než panenské. V USA ještě minulý rok fungoval startup Project PLA [23]. Ten výtisky z PLA nijak nerecykloval, ale sloužil jako prostředník s průmyslovými zpracovny odpadu, které dokážou PLA zkompostovat. Na stránkách bylo možné si objednat krabici různých velikostí, kterou má uživatel naplnit a zpět zdarma firmě poslat. Jednalo se tedy spíš o snahu zabránit hromadění plastu na skládkách a v přírodě. Stránky projektu už nejsou funkční. Společnost Terracycle, která se více zabývá recyklací hůře recyklovatelného odpadu, nabízí možnost zakoupit si box s předplacenou poštou a zárukou, že materiál bude recyklován. Tuto službu nabízí i pro odpad z 3D tisku, kdy není potřeba třídit jednotlivé materiály a není omezení na jednotlivé technologie 3D tisku. Jedná se o službu především pro ty, kterým záleží na tom, kde odpad končí. Služba pro jednu krabici o rozměrech 28x28x51 cm stojí 95\$ [24]. Recyklace plastů v soukromém provedení se začíná pomalu rozšiřovat. Důležitým důvodem může být i výroba vlastního levného filamentu z nových pelet a recyklace tisků je další krokem k snížení nákladů. Třídění a svoz i na úrovni větších firem jde řídit mnohem jednodušeji a efektivněji než u řešení pro města. Pokud je ve větší míře používáno stejných filamentů od stejných výrobců, případně vlastního filamentu, lze dosáhnout mnohem větší homogenity vlastností a čistoty recyklátu.

2.5.1 Projekt Precius Plastic

Recyklací plastů obecně, ale i 3D tisků se zabývá mnoho komunit. Jednou z nich je komunita okolo Precius Plastic. Jejich cílem je snížit množství plastového odpadu tím, že ho budou sami recyklovat. Projekt začal fungovat v roce 2013 a funguje dodnes. Od ledna roku 2020 se v rámci svého vlastního podprojektu Precious Plastic Universe snaží stát globálním alternativním recyklačním systémem. Dávají k dispozici hotové řešení od strojů (návodů na stavbu i možnost koupit stavebnice a sestavené stroje) přes návrhy výrobků až po byznys plány. V rámci projektu je re-extruze odpadu na filament teprve na začátku a není pro ni oficiální dokumentace, přesto je k vidění v některých z jejich mnoha videí [25, 26]. Plasty sbírají, třídí, drtí a následně dále zpracovávají. K tomu využívají technologií vyhřívaných lisů pro výrobu desek a extruze pro výrobu tyčí a profilů. Na složitější polotovary a výrobky využívají technologii vstřikolisů. Součástí projektu je také bazar, kde účastníci nabízejí a poptávají výrobky, materiály, ale i díly a hotové stroje. Většina výrobků je uměleckého charakteru, případně v rozvojových zemích vyrábí lokálně potřebné produkty [27].

2.5.2 Recyklovaný filament

Existují firmy, které se specializují na recyklaci průmyslových odpadů a jeho následného přetváření na filament. V Česku se jedná například o firmu EkoMB, která nabízí pouze recyklované filamenty z materiálu PLA, PET a PETG. v USA nabízí firma RePLAy recyklované filamenty pouze z PLA. EkoMB v rámci recyklace zavedlo zpětný odběr prázdných cívek, kdy cívky je možno bezplatně odevzdat na šesti místech v republice, případně je do firmy zaslat. Za odevzdané cívky zatím není žádná odměna. Cívky, které nejsou dále použitelné jsou rozdrceny a recyklovány. Firma RePLAy sice nenabízí odběr cívek, ale nabízí možnost zažádat si o předplacenou zásilku⁷, podmínkou je předchozí zakoupení jejich filamentu. Krabici, ve které přišel filament je možné naplnit až jednou librou (454 g) odpadu, přičemž za každou unci (28 g) obdrží uživatel jeden bod. Přestože firma nabízí pouze recyklované PLA a struny z PET-G ani ABS nenabízí, je možné je také odeslat, dokonce je to možné v rámci jedné krabice, pokud budou v oddělených sáčcích s popisky. Zákazník může body, které obdrží také za nákup recyklovaného filamentu, směnit za slevy a vzorky zdarma. Zatím však nenabízejí filament recyklovaný z 3D tisků, na stránkách to zdůvodňují tím, že se jim nepodařilo nashromáždit dostatečné množství odpadů z 3D tisku, aby bylo ekonomické vyrobit várku filamentu. v případech obou firem je cena

⁷ v době psaní DP se mi nepodařilo zažádat o předplacené poštovné, ani po použití VPN s lokací v USA. Stránka, na které by měl být formulář pro žádost o předplacenou poštu, ani stránka s kontakty, nelze načíst. Firma na dotazy nereaguje. V únoru 2021 stránky fungovaly a filament šlo zakoupit. V květnu 2021 už stránky ukazují pouze informaci, že brzy budou aktualizované.

filamentu nadprůměrná (PLA 500 Kč/28 \$). Na rozdíl od ostatních výrobců musejí krom výroby filamentu do výsledné ceny zahrnout i svoz, třídění a drcení, které budou vyšší než nákup nového granulátu [28, 29]. Síla ekologické stránky výroby recyklovaného filamentu roste s decentralizací výroby. V nejlepší případě (vysoká decentralizace, nízká hustota osídlení) může ušetřit více než 80% energie nutné na recyklaci. V případě, že by se prováděla decentralizovaná recyklace HDPE na území celých Spojených států amerických, došlo by k úspoře více než 100MJ energie [30].

2.6 Výzvy recyklace 3D tisku

Hlavní výzvy budou jiné při recyklaci v komunitním FabLabu, v domácí dílně, malé/velké firmě a školní učebně.

2.6.1 Čistota a třídění vstupní suroviny

Třídění

Nejednoduším způsob, jak vytrdit jednotlivé materiály, je mít kontejnery pro všechny materiály, které chceme recyklovat, a pro ostatní materiály, které se vyhodí do běžného odpadu. Je potřeba rozlišovat i mezi jednotlivými variantami materiálu. I velmi malé množství PLA-HT, které se tiskne při teplotách o 20°C vyšších než generické PLA, může způsobit problémy s extruzí a selhání tisku. Díky nákladnosti dotřídění je potřeba proškolit všechny, kteří budou tisknout, a zbytky z tisků třídit ihned, dokud si je uživatel jistý, z jakého materiálu tiskl. Pokud je k dispozici více strojů, může být vhodné pevně určit filament pro daný stroj a u každého mít vlastní kontejner na zbytky. Způsob opatření se odvíjí od počtu uživatelů, pravidelnosti, s jakou stroje využívají, a úrovně jejich kázně.

Přípravky pro zlepšení adheze a lepidla

Tiskaři často používají podpůrné prostředky pro zvýšení adheze k podložce. Běžně se jedná o lak na vlasy, 3DLAC, ABS juice, tyčinkové nebo Herkules lepidlo, izolepy, cukrová voda a další. Na výsledný tisk se přenesou pouze stopové množství nemající vliv na kvalitu recyklátu. Stejně je to s výrobky z více výtisků, ty jsou nejčastěji slepeny pomocí rozpouštědel, které naleptají vrstvičku materiálu a spoj je proveden bez nežádoucí kontaminace. Další možností spojování jsou vteřinová lepidla, přestože se na tisku mohou nacházet ve větším než stopovém množství, dojde při reextruzi k jejich rozložení na kyanovodík. Běžná vteřinová lepidla se začínají rozkládat při teplotách okolo 100 °C, vysokoteplotní varianty⁸ okolo 150 °C. Problém může být u epoxidových pryskyřic, které se rozkládají až okolo 400 °C [31]. Další problém může vzniknout, pokud díl, přilepený k materiálu, i po strhnutí na něm částečně

⁸ Společnost Permabond vyrábí speciální vteřinové lepidlo Permabond C 920 s odolností až 250 °C

zůstane. Ať se jedná o dřevo, omítku nebo tkaniny, hrozí ucpání trysky a tento materiál není pro recyklaci vhodný.

Barvy a tmely

Mnoho modelů je po vytištění tmeleno a barveno. Vhodnost k recyklaci je potřeba posoudit podle úrovně zakrytí modelu. Malé modely pro deskové hry bývají tmeleny, lepeny a barveny v mnoha vrstvách, podíl kontaminantů vůči recyklovanému materiálu může být značný a kvalita recyklátu by mohla být zásadně ovlivněna. Přestože u větších modelů může být poměr mnohem lepší, tak riziko zničení várky filamentu zůstává a je potřeba zvážit, jestli ušetření pár korun stojí za riziko rozebírat a čistit celý stroj. Barvy se dají odstranit pomocí chemikálií, ale cena takto očištěného materiálu, pokud bereme v potaz i čas, převyší cenu kupovaného granulátu.

Ostatní materiály

Některé komplikovanější tisky obsahují zatisklé, nebo vlepené díly z jiných materiálů, často se jedná o matice, magnety, dřevěné a kovové kolíky, čepy a tyče. Tyto díly je potřeba před recyklací odstranit, jinak hrozí poškození recyklačních strojů. Pokud výtisky přišly do styku s mastnotou, oleji, chemikáliemi nebo jinými látkami, které by na nich mohly ulpívat, je potřeba je před drcením umýt, případně mít zajištěné vyčištění drtě od těchto látek. Čištění musí být v procesu přítomno už kvůli prachu, který negativně ovlivňuje kvalitu filamentu.

2.6.2 Drcení

Je důležité, aby po průchodu drtičem byla drť co nejvíce homogenní. Vzhledem a rozměry by se měla co nejvíce blížit novému granulátu. Možností pro drcení je mnoho a každá má své výhody a nevýhody.

Domácí spotřebiče

V domácích podmínkách se často využívají stroje jako mixér, skartovač papíru, nebo drtič na větve. Mixér byl úspěšně použit v rámci rozvoje RepRap technologie na Technické Univerzitě Delft [32]. Z testování vyplynula velká potřeba kontroly ze strany obsluhy, musí se drtit po malých dávkách a s přestávkami, aby nedošlo ke spečení materiálu. Je vhodné materiál chladit, pokus s podchlazením materiálu pod teplotu skelného přechodu⁹ se ukázal jako neúčinný, chlazení vodou naopak vedlo k velmi dobrým výsledkům. Podle konkrétního mixéru je navíc většinu vstupního materiálu potřeba předdrtit, aby se materiál dostal k rotoru mixéru. Běžné skartovače papíru na drcení nejsou moc vhodné. Pokud ale máme k dispozici skartovač, který je určen pro recyklaci desítek stran a pamětových medií, může být úspěšně použit. Pokud využijeme jen krajů skartovacích válců, je kvalita velikosti drtě dostatečná. V případě větších dílů nebo použití středů válců nedochází k účinnému dělení

⁹ Například u HDPE pod -20 °C.

materiálu. Drtiče větví jsou vhodné pouze na předdrcení a je potřeba je kombinovat s další technologií. Rozdíl v kvalitě drcení lze vidět na obr. 4.



Obr. 4: Zleva: Drť po průchodu skartovačem papíru, po úpravě skartovače tak, aby procházel pouze krajem a drť zpracována drtičem větví [33].

Specializované stroje

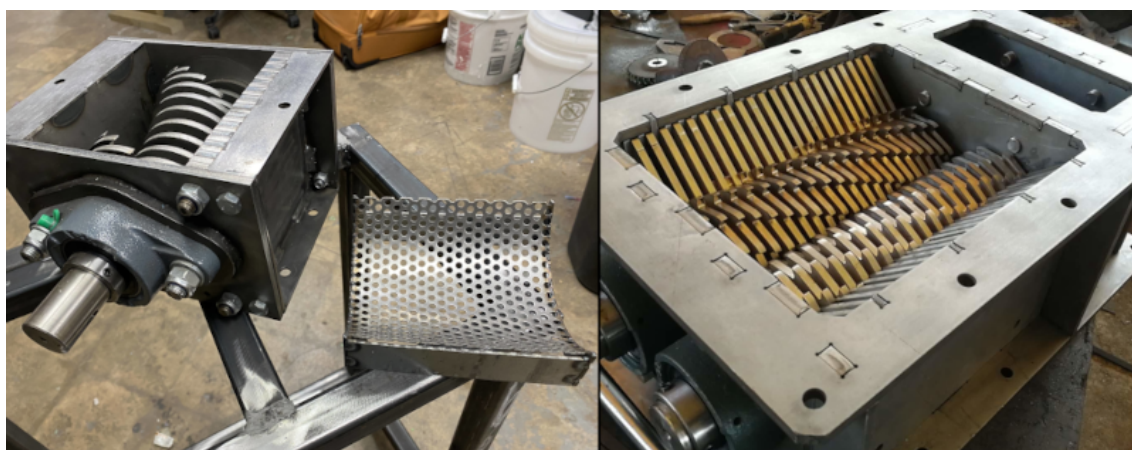
Pro drcení plastu lze najít jednoúčelové stroje z profesionální i opensource oblasti. Většinou se jedná o zmenšené průmyslové drtiče odpadu a kovového šrotu, obr. 5. Fungují na principu řady rotačních a statických nožů. Výkonější stroje mají dvě řady protisměrně se otáčejících hřídelí s noži. Obr. 6. Výsledná velikost drtě je určena vstupní surovinou, geometrií ostří a počtem průchodů. Hlavním faktorem určující rozměr drtě je sítko, obr. 7, které neumožní větším kusům propadnout a jsou automaticky znovu drceny. Tato jednoduchá metoda zvýšení kvality je vykoupena zpomalením drcení a zvýšením nároků na výkon motoru.

Drtič ShredIT, který byl vyvinut přímo pro recyklaci plastů na filament, je kombinovaný s regranulátorem. Z velikosti násypky a sběrné nádoby jde dobře vidět¹⁰, že je vhodný pouze pro malé součásti a provoz v menším měřítku. Má integrované sítko s průměrem děr 3 mm. Precious Plastic má jak jedno tak i dvou hřídelovou variantu, ale obě jsou navrženy pro mnohem hrubší výstup, než jaký je vhodný pro výrobu filamentu. Stroj lze jednoduše modifikovat vhodnou velikostí sítka, případně

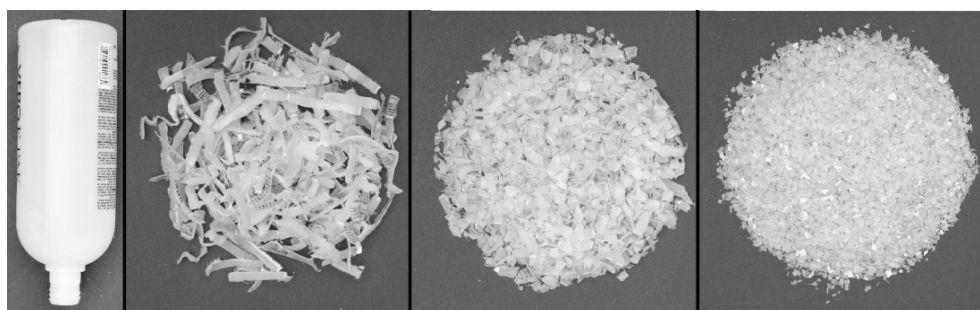
¹⁰ Víčka na obr. 5 jsou širší variantou, používají se například na lahvích od mléka, džusu...



Obr. 5: Zleva: Andy's Machine shredder [34] 233 €, Precious plastic Basic Shredder [35] 1000 € , ShredIT [36] 3000 €.



Obr. 6: Jedno hřídelová a dvouhřídelová varianta [27].



Obr. 7: Zleva: vstupní materiál, bez sítka, se sítkem s dírami o \varnothing 10 mm, se sítkem s dírami o \varnothing 5 mm [27].

vícenásobným průchodem materiálu, což ve svých videích dělají a úspěšně filament z této drti vyrábí. Výhodou je možnost drtit velké součásti. Má vyměnitelné sítko s běžným průměrem děr 5 až 7 mm. Cena stroje od Andyho je tak nízká především proto, že jde pouze o cenu za surový materiál a bazarové díly. V základu nemá sítko, díky čemu není vhodný pro zamýšlené použití. Jedná se ale o OpenSource projekt, ze kterého se dá dobře vycházet při návrhu vlastního řešení.

<i>Výrobce</i>	<i>počet nožů</i>	<i>příkon [kW]</i>	<i>otáčky [ot/min]</i>	<i>produkce [kg/h]</i>
3Devo	6	1	9	4
Precious Plastic	15	2.2	70	9
Andy's Machine	13	2	50	12

Tab. 1: Vlastnosti vybraných drtičů.

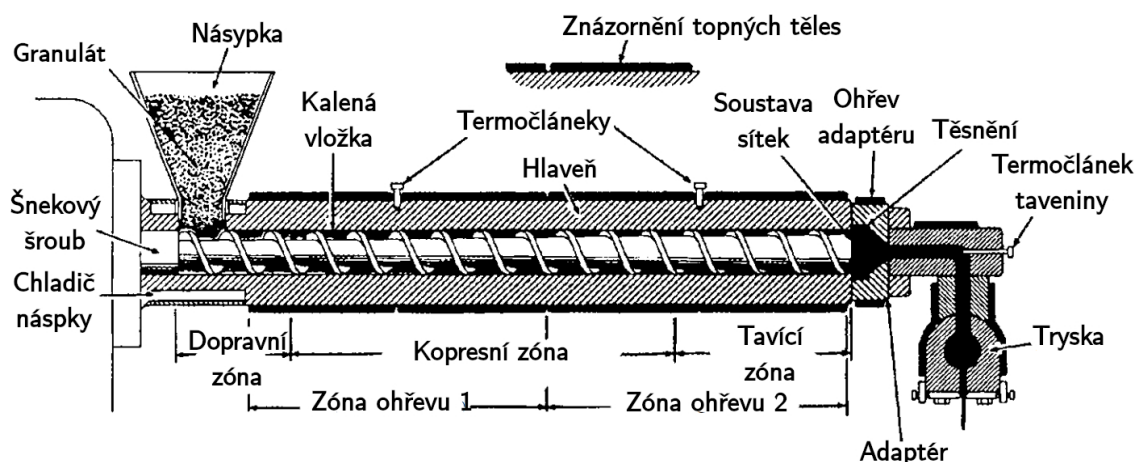
2.6.3 Extruze

Pro výrobu tiskové struny se používá technologie extruze termoplastů pomocí šnekového podavače na obr. 8. Termoplast je z násypky transportován kompresním šnekovým dopravníkem skrz několik ohřívacích zón s výkonem okolo 4 kW. Šnek je také rozdělen na oblasti z různým účelem. Nejčastěji se používají kompresní šneky, které mají proměnnou tloušťku jádra, ale komprese může být provedena i změnou rozteče závitů, případně zde mohou být i speciální oblasti pro promíchání a odplynění. Šnek je uložen v hlavni s vůlí $0,08 \pm 0,05 \text{ mm}$. Hlaveň je hladká¹¹ a často má vyměnitelnou kalenou vložku. Poměr délky a průměru $\frac{L}{D}$ se pohybuje nejčastěji mezi 24:1 a 36:1, ale může být i větší. Ohřev se poté odehrává na delší vzdálenosti a produkce stroje může být vyšší, narůstá odpor materiálu, je potřeba silnější pohon a zároveň dochází k většímu prohnutí šneku a rychlejšímu opotřebení zařízení. Důležitým prvkem je soustava sítěk, která krom zřejmé funkce bránění vzniku kontaminantů do produktu, slouží i jako poslední prvek na kterém dochází k odplynění taveniny. Tryskou s otvorem požadovaného tvaru je následně vytlačován materiál v kačukovitém nebo roztaveném stavu. Může se jednat o tyče, potrubí, pláty, filmy, profily, případně může rovnou docházet k pokrývání základního materiálu, nejčastěji drátů. Po výstupu z trysky je nutné výrobek zchladit, aby došlo k zachování požadované geometrie.

Důležité technické vlastnosti plastů

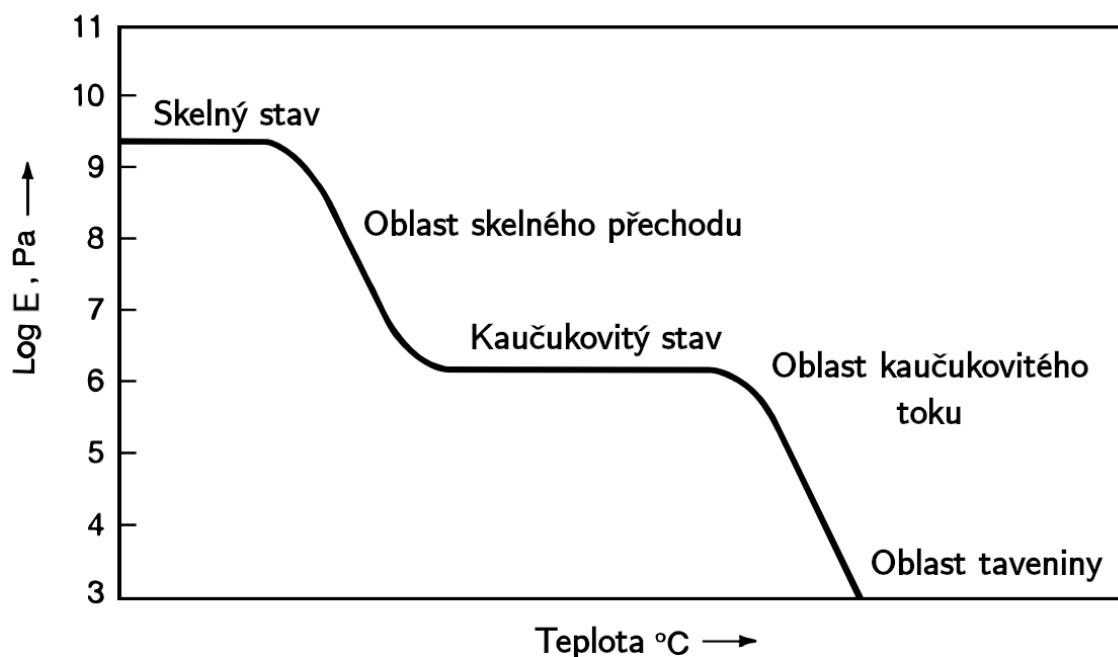
Použití této technologie vychází ze specifického chování termoplastů, především ze závislosti Youngova modulu na teplotě, viz obr. 9. Využitím oblastí skelného přechodu a kaučukovitého stavu můžeme používat technologie jako extruze, ale i vyfu-

¹¹ Pro materiály s nízkou sypanou hmotností byly vyvinuty speciální hlavě s drážkováním v dopravní a kompresní zóně, které pomáhají přesunu problematického materiálu.



Obr. 8: Schéma jednošnekového extruderu [37].

kování, vstřikování, vakuové formování a mnohé další. Velikost granulátu je zásadní



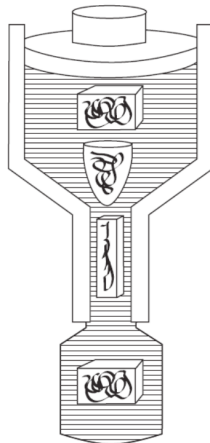
Obr. 9: Obecný vztah mezi Youngovým modulem a teplotou [37].

pro plynulost dopravy do tavicí zóny. Volný tok materiálu nastává při velikosti od 1 do 5 mm a válcovém či kulovitém tvaru. Rozsah velikostí mezi 1 a 0,1 mm je přechodnou oblastí, kdy tok může být volný až polovolný. Prášky o velikosti menší než 0,1 mm mají tendenci k soudržnosti a zachytávání vzduchu. Naopak kusy větší než 5 mm mají tendenci ke vzpříčení a blokování toku. Synná hmotnost je hustota nestlačených polymerních částic včetně prostoru mezi jednotlivými částmi. Pokud je menší než $0,2 \text{ g/m}^3$ dochází k problémům během dopravování. Tato vlastnost nezohledňuje zhuštění, ke kterému dojde díky změně natočení při pohybu materiálu,

nebo jeho deformaci. Zavádí se tedy další vlastnost stlačitelnost, která je vyjádřena jako procentuální rozdíl mezi objemem v případě volně loženého a shluklého materiálu. Pokud je stlačitelnost menší než 20 % je zaručen volný tok, při 20 až 40 % je zvýšená náchylnost ke shlukování během skladování, v závislosti na délce skladování je ovlivněna schopnost materiálu volně téct. Na 40 % je materiál velice jednoduše stlačitelný a snadno dochází ke shlukování. Gravitační zásobníky musí být doplněny o zařízení, které pomáhá toku ke šneku. Proti toku působí také koeficient tření, který je v tomto případě potřeba rozdělit na vnitřní koeficient, který popisuje tření mezi částčkami plastu, a vnější, který popisuje tření plastu o okolní materiál. V případě dopravy za pokojové teploty je zcela dominantní složka vnější. Až v případě, že dochází během přepravy k deformaci (například v kompresní části šneku, zvyšující se teplotou, tlakem okolních částí, ...), získává vnitřní složka na významu.

Die swell

Otok za tryskou vzniká jako důsledek polymerních řetězců. Ty se přirozeně vyskytují v náhodné orientaci, ale díky toku materiálu se postupně orientují rovnoběžně s proudnicemi. Jelikož náhodné uspořádání je nejméně energeticky náročné, dochází v případě, že je to materiálu umožněno, k návratu do náhodného uspořádání, což má za následek změnu tvaru formovaného polymeru. Pokud je vytlačován kruhovým průřezem, dochází těsně za tryskou ke zvětšení průměru, viz obr. 10.

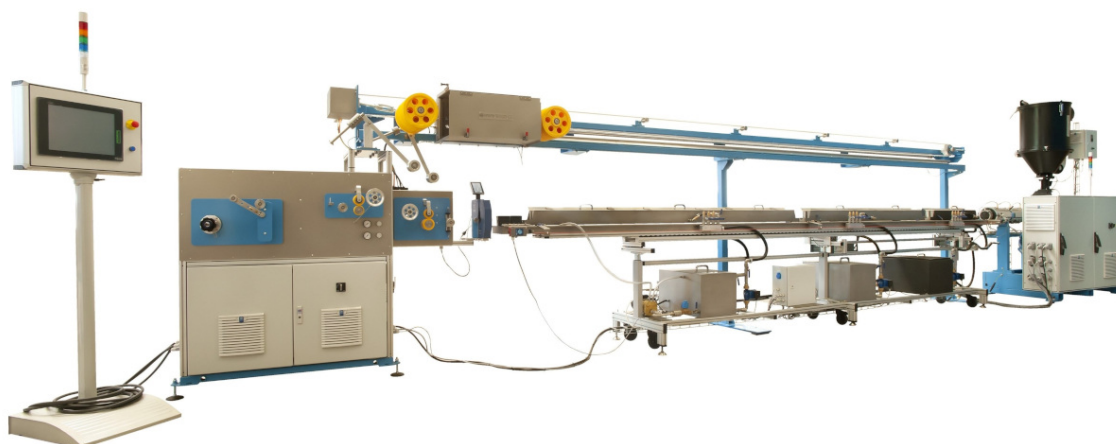


Obr. 10: Znázornění uspořádání řetězců polymerů během vzniku otoku za tryskou [38].

Průmyslové stroje

Jedná se o halové stroje mající i desítky metrů na délku, schopné produkovat i vyšší desítky kg výrobků za hodinu.

Česká firma BOCO Pardubice vyrábí univerzální linku, viz obr. 11, pro výrobu plastových strun, včetně struny pro 3D tiskárny. Linka je tvořena jednošnekovým extruderem, 6-ti metrovou chladicí vanou, odtahovým zařízením, tříosou měřicí



Obr. 11: Linka pro výrobu filamentu od firmy BOCO Pardubice [39].

stanicí, akumulátorem pro 140m struny a navíjecím zařízením. Linka je schopná produkovat až rychlostí 100 m za minutu (18 kg za hodinu). Šnek má průměr 45 mm s poměrem L/D 30 a je poháněn 9,2kW motorem.

Komerční projekty

Jedná se o stolní až linkové stroje, viz obr. 12 většinou nezabírající více než 3 m na délku. Typicky se skládají ze zásobníku granulátu, extruderu, kontrolního bodu a navíječe. Používají šnekové kompresní šrouby a vícezónové vyhřívání.



Obr. 12: Komerční extrudery.

Tab. 2: Parametry extruderů

Stroj	příkon [W]	maximální výkon [kg/h]	tolerance [mm]	cena [Kč]
3Devo Precision 450	400	0,5 ¹²	± 0,05	152 800
Filabot EX6	1000	4,5	± 0,05	292 000
Filabot EX2	200	1	± 0,05	100 500
Protocycler+	120	0,5	± 0,05	73 400
Filastruder	50	0,2	± 0,03	10 700

3Devo Precision 450 [40], na obr. 13, je stroj s 4 zónovým vyhříváním šneku, vyměnitelným šnekem pro různé typy a mixování materiálů. Stroj je velice kompaktní a vzdálenost mezi tryskou a navíječem není delší než 60 cm. K senzoru je to ještě méně, zhruba 25 cm. Chlazení je řešeno dvojicí proti sobě foukajících axiálních ventilátorů. Bohužel z fotek a videí není patrný způsob řešení toku vzduchu, ale minimálně ze 4 stran je tento prostor zakrytován. Díky teplotě trysky až 450 °C může zpracovávat drtivou většinu materiálů.



Obr. 13: Čelní pohled na precision 450.

Filabot EX6 [41], obr. 14, je také 4 zónový, s vyměnitelnými šneky a mnohem více zaměřený na výkon než na prezentaci. Zařízení je tvořeno třemi oddělenými stoji, extruderem, chladicí částí a navíječem. Neobsahuje žádný měřicí bod¹³. Průměr se ručně ladí rychlostí návinu a změnou teploty. Vzdálenost mezi tryskou a navíječem

¹³ Ten lze samostatně dokoupit, ale umožní pouze loggování a živý přenos průměru.

má dle návodu být 60 až 140 cm dle materiálu. Pro chlazení využívá sestavu šesti axiálních ventilátorů. Zvládá produkovat většinu materiálů, jediný, o kterém se výrobci zmiňují jako o problematickém, je PET, kvůli vysokému indexu toku taveniny. EX2 má pouze jednu tepelnou zónu, kratší, menší a nevyměnitelný šnek. Hlavním rozdílem je nižší výkon a horší promíchání barev. Protocycler [42] je kompaktní řešení,



Obr. 14: Kompletní set Filabot EX6.

avšak výrobci neuvádí mnoho informací. Když vstupovali na trh s první verzí, slibovali v rámci kampaně na indiegogo [43] mnohonásobně lepší parametry za pětínovou cenu současné verze, ta má navíc integrovaný drtič na ruční pohon. Vzdálenost mezi tryskou a měřicím bodem je menší než 10 cm. Stroj by měl být plně automatický bez dalšího ladění a funkční rovnou po vybalení z krabice. Stroj nepůsobí moc dobře a komentáře na indiegogo jsou převážně o nulové komunikaci, nedodání zaplacených zařízení ani po 3 letech od skončení kampaně atd. Stroj je zde uveden jako špatný příklad. Filastruder [44], nejlevnější zde uvedená varianta, má pouze jednozónový ohřev. Velkou výhodou je, že díky nízké ceně vznikla rozsáhlá aktivní komunita soustředěná okolo dedikovaného fóra <http://www.soliforum.com/>. Toto fórum obsahuje mnoho nápomocných informací. Teplota trysky je limintována na 260°C, což omezuje rozsah možných materiálů na nejčastěji používané. Většina uživatelů se s přesností bez navíječe dostane na $\pm 0,05$ mm a s navíječem i na $\pm 0,03$ mm. Několik uživatelů podalo reporty o úspěšné výrobě PET filamentu s přesností pohybující se kolem $\pm 0,08$ mm. Je otázkou jakým způsobem měření probíhalo a jestli tendencí lidí nadhodnocovat své výsledky nedochází ke zkreslení dat.

OpenSource projekty

Hugh Lyman je konstruktér v důchodu, kterému si sice nepodařilo získat titul na univerzitě, zato je držitelem osmi patentů a výhercem soutěže z roku 2012 Maker Education Initiative, jejímž cílem bylo sestavit zařízení schopné vyrábět tiskovou strunu za cenu nižší než 250 \$. První návrh byl diskvalifikován kvůli nezapočítání ceny práce na obrábění dílů, které sám vyráběl. Proto velice rychle přišla druhá verze, se kterou soutěž vyhrál [45]. Od té doby v téměř pravidelných půlročních intervalech vydával nové vylepšené verze extruderu. V roce 2015 se vývoj zastavil

na šesté verzi, obr. 15. Přehled změn je uveden v tabulce 3. Extrudery používá pro výrobu 3mm filamentu, důvodem jsou odchylky na průměru. Pokud je odchylka $\pm 0,1$ mm na $\varnothing 3$ mm je procentuální změna 6,66% v případě $\varnothing 1,75$ je 11,42%. Jedná se o stroje s jednozónovým ohřevem pomocí tryskového topného tělesa a místo kompresního šneku je použit hadovitý vrták do dřeva. Mnoho stavitelů Recyclebotů vychází z jeho návrhů, o čemž vypovídá i počet stažení jeho návodů, které byly staženy více než 223000×.



Obr. 15: Evoluce extruderů od H. Lymana [46, 47].

RepRapable Recyclebot. Obr. 16, je zařízení vyvinuté pro zjištění potenciálu decentralizovaného třídění plastového odpadu na filament. Bylo vyvinuto na MIT a v roce 2018 publikováno. Jednozónový stroj s hadovitým vrtákem místo šneku je schopen produkovat rychlostí 0,4 kg/h s odchylkou $\pm 0,08$ mm při spotřebě 0,24kWh/kg. Cena výroby z granulátu je pětina oproti kupovanému a až tisícina při použití recyklovaného plastu. Teplotní strop pro výrobu je 250°C, umožňující produkci všech běžně používaných materiálů. Zařízení je inspirováno jak komerčními verzemi, tak extrudery od Hugha Lymana.

FelFil, na obr. 17, je polokomerční a nejkompaktnější řešení. Kromě kompletního návodu nabízí i plně složený model (720 €), kompletní kit (599 €) anebo pouze obtížně sehnatelné části (299 €). Ty jsou tvořeny zpřevodovaným motorem, kovovými částmi, šnekovým kompresním šroubem, tavnou komorou a tryskou. Ohřev je

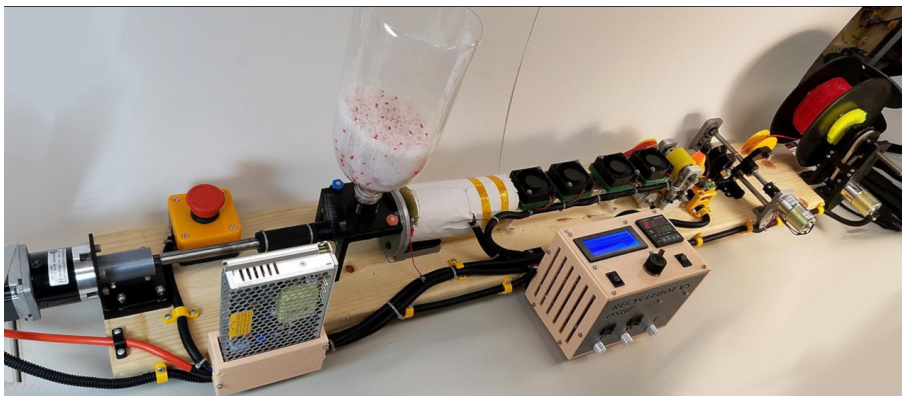
Tab. 3: Přehled změn mezi jednotlivými evolucemi

evoluce	změny	produkce [kg/h]	datum
I	prototyp, průměr řízen teplotou a rychlostí otáčení vrtáku	0,1	září 2012
II	snížení ceny a zvýšení tuhosti	0,1	listopad 2012
III	celkové zjednodušení extruderu, vodní chlazení struny	0,5	září 2013
IV	průměr řízen pomocí vytahování filamentu, nutnost synchronizovat rychlost nuceného chodu a vrtáku v extruderu	0,5	březen 2014
V	návrat k chlazení vzduchem, kontinuální měření průměru (bez zpětné vazby), ovládání pomocí LCD, zvýšení ceny na 600\$	0,28	červenec 2014
VI	Vertikální varianta, zvýšení přesnosti na $\pm 0,06$, návrat k řízení průměru pomocí teploty a rychlosti motoru, zjednodušení dílů, aby mohly být tištěny na tiskové ploše 20x22 cm	0,33	prosinec 2015

realizován trojicí topných těles, používaných v 3D tiskárnách. I přes použití skutečného kompresního šroubu, dosahuje produkce pouze 180 g za hodinu, což je dáno především velmi malými rozměry. Průměr je řízen pomocí teploty, rychlosti motoru a případně vzdáleností trysky od podlahy v případě, že není použito navíječe. Výsledný filament dosahuje přesnosti $\pm 0,07$ mm.

2.6.4 Filament

Podle modelu tiskárny se používají filamenty o průměru 1.75, 2.85 a 3 mm, většina výrobců deklaruje odchylku průměru menší než $\pm 0,05$ mm, značka SmartFil udává $\pm 0,03$ mm. Značky jako Prusament a Fiberlogy se chlubí hodnotou $\pm 0,02$ mm. Fluktace objemového toku se díky tomu snížila z 11,4% na 4,5%. Průměr se měří ve dvou osách kvůli hodnotě ovality. Což je další důležitý parametr filamentu. Většina výrobců uvádí hodnotu $\pm 0,01$ mm. Důležitou vlastností je možnost tisku, kdy (kromě správné teploty) způsobuje největší problémy vlhkost. Protože tisk probíhá vysoko nad teplotou varu vody, dojde při průchodu tryskou k jejímu velmi rychlému

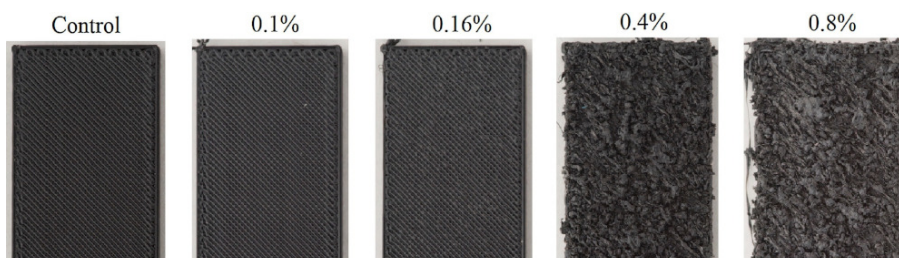


Obr. 16: RepRap Recyclebot [48].



Obr. 17: FelFil extruder [49].

odpaření¹⁴. Tím, jak pára zvýší svůj objem, dochází k přerušení toku materiálu a se-
lhání tisku, obr. 18. Různé materiály jsou na vlhkost různě citlivé, některé mohou
být skladovány volně v prostoru, kde není extrémní vlhkost. Jiné je potřeba před
tiskem vysušit, ale jsou i materiály, které nelze tisknout jinak než přímo ze sušící ko-
mory. Například Nylon, ULTEM, nebo PET je schopný absorbovat vlhkost nad mez
ovlivňující kvalitu tisku již v řádu hodin. Dalším už spíše doplňkovým parametrem je



Obr. 18: Tisk materiálu ULTEM s různým obsahem vody [50].

¹⁴ Tento problém se projevuje "lupkáním" při tisku.

barva. Většina výrobců si udržuje stálý odstín barev tím, že každá várka je míchána zvlášť, může tak však docházet k barevným odchylkám mezi šaržemi. Vyjímkou jsou filamenty firmy ColorFab [51], která vyrábí zákazkově barvy dle vzorníku RAL.

3 VLASTNÍ ŘEŠENÍ

Cílem bylo navrhnout extruder a navíječ filamentu, který by byl postaven ve dvou kusech. Jeden pro fakultu a jeden pro mé osobní použití. Což vedlo k volbě dílů podle levého horního segmentu rozdělení dle Milтона Friedmana¹ viz obr. 19.

		Na koho jsou peníze utráceny	
		Já	Někdo jiný
Či peníze jsou utráceny	Moje	Šetřit a hledat vysokou hodnotu	Šetřit a nehledat vysokou hodnotu
	Někoho jiného	Nešetřit a hledat vysokou hodnotu	Nešetřit a hledat vysokou hodnotu

Obr. 19: Čtyři způsoby utrácení peněz dle Milтона Friedmana.

3.1 Návrh

Vlastní návrh byl založen především na inspiraci z řešení, které úspěšně provozují jednotlivci a univerzitní skupiny. Návrh podle průmyslových strojů není úplně možný kvůli ceně použitých technologií. Hlavním cílem komunity okolo neprůmyslových extruderů bylo hledání alternativních způsobů dosažení dostatečných výsledků za přiměřenou cenu. Celý návrh je provázán a nelze postupovat krok za krokem a vybírat jednotlivé díly, ale je potřeba si uvědomit provázanost technologií, rozměrů a cen. Několikrát během návrhu došlo k výběru dílů nebo změnám, které vedly k přehodnocení již hotových částí. Velmi důležitým parametrem při výběru dílů byla dostupnost, kdy byly vybírány pouze díly skladem s možností doručení v rámci dnů. Tyto díly byly většinou i levnější.

3.1.1 Extruder

Ve své nejjednodušší podobě jde o jakýkoliv zařízení, které skrz trysku vytlačuje zahřátý plast. Kritické položky jsou šnekový podavač, topná tělesa a motor.

¹ „Existují čtyři způsoby jak utratit peníze. Můžete utratit své vlastní peníze sám pro sebe. Pak si dáváte dobrý pozor, co děláte, a snažíte se dostat co nejvíc. Potom můžete utratit své peníze pro někoho jiného. Například někomu koupím dárek k narozeninám, přitom se příliš nestarám o obsah, ale dávám pozor na cenu. Také mohu utrácet cizí peníze pro sebe, to si zaručeně dopřeji dobrý oběd. A konečně, mohu utrácet cizí peníze pro někoho cizího. Pak je mi jedno za kolik a co vlastně dostanu. A to dělá vláda.“ Milton Friedman [52]

Topné těleso

Hlavní kritéria pro výběr topného tělesa byla cena, možnost jednoduché zástavby a výkon. Patronová topná tělesa jsou i díky rozmachu 3D tiskáren dobře dostupná, ale mají nízký výkon a značně zvětšují zástavbový prostor tavící zóny. Trysková topná tělesa, viz obr. 20, jsou sice řádově dražší. Pro jednozónový extruder je ale potřeba jenom jedno a umožňuje návrh tavící zóny s menším průměrem. Obepsal jsem několik firem zabývajících se jejich prodejem a nejnižší cenovou nabídku skladového kusu s vhodnými rozměry jsem dostal do firmy Technotrend. Jedná se o 160W topné těleso DH400 s nerezovým pláštěm a rozměry D30x30 s provozním napětím 230 V. Výkon převyšuje běžně používané 100W a 60W topná tělesa z Recyclebotů a Extruderů inspirovaných Lymanem.



Obr. 20: Tryskové topné těleso s mosazným pláštěm [53].

Šnekový podavač

Cena kompresního šneku násobně převyšuje běžný rozpočet na celou sestavu. Například šroub od fy Filabot stojí v základní variantě téměř 18 000 Kč. Z číny lze pořídit kopii šneku používaného v extruderech od Precious Plastic okolo 8 500Kč. Nejběžnější náhradou je hadovitý vrták, viz obr. 21, který je navržen pro dobrý odvod třísky z hlubokých děr. Uložení vrtáku je pomocí kluzného ložiska s límcem, kvůli dobrému přenosu axiálních sil a ceně. Většina komunity okolo extruderů se nachází na území, které dodnes používá imperiální jednotky. Běžnou velikostí vrtáku je 5/8", z toho vychází i výběr hlavně a topného tělesa s průměrem 1". Pro metrický systém, bylo potřeba výběr trochu upravit, tak aby do sebe běžně dostupné části pasovaly bez složitého obrábění. Průměr vrtáku byl zvolen nejbližší k imperiální jednotce, tedy 16 mm a délkou pracovní částí 385, což odpovídá poměru $\frac{L}{D} \simeq 24$. Pro hlaveň,



Obr. 21: Hadovitý vrták do dřeva.

byla vybrána hydraulická přesná bezešvá trubka. Především kvůli kvalitě vnitřního povrchu, dobré dostupnosti a možnosti zakoupit krátké délky. Vnitřním průměrem byl dle vrtáku volen 16 mm a vnější, kvůli možnosti vyřezat jemný závit, 20 mm.

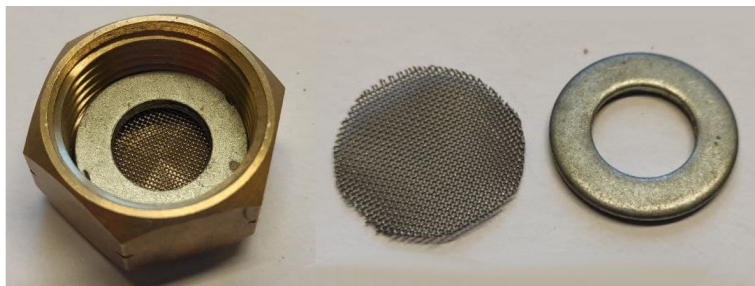
Pohon

Požadavky na výkon motoru vyplývají z konstrukčního návrhu šneku. Největší roli hraje tření granulátu, které dokud nedojde k jeho natavení, je poměrně malé, ale v okamžiku natavení několikanásobně vzroste. Jednotlivé konstrukce se tedy liší v tom, jak daleko zasahuje vrták do zóny tavení. Pokud je tato vzdálenost menší než 1 cm, je možné použít slabý motor (běžně se používají výkony ± 30 W). V případě větších vzdáleností nastávají problémy a lidé, kteří se pustili touto cestou, musí používat zpřevodované motory o výkonu stovek Wattů. Jelikož není potřeba řídit pozici, ale pouze rychlost otáčení motoru, je vhodnou volbou, i díky své plynulosti, stejnosměrný motor. Vhodné stejnosměrné motory s převodovkou stojí okolo 4 tisíc. Bylo potřeba najít levnější alternativu, tou mohly být levné čínské motory pochyné kvality nebo motory o potřebném výkonu masově používaných pro konkrétní účel. Jako vhodné se ukázaly stěračové motory z automobilů, které mají výkon 30 až 40 W dle modelu a jsou již zpřevodované šnekovou převodovkou na přibližně 60 otáček za minutu. Z internetových obchodů se dají sehnat jako neoriginální náhradní díl do 1500 Kč. Převod je realizován ozubenými koly. Vývrh převodovky umožňuje použít ozubená kola s možným převodovým poměrem 1:1 až 3:1. Kromě většího kroutícího momentu přinese převod do pomala i možnost jemnějšího ladění rychlosti. V základu má krokový motor 45 nebo 60 otáček za minutu. Pro úspěšnou výrobu jsou vhodné rychlosti v rozmezí 8 až 20 otáček za minutu.

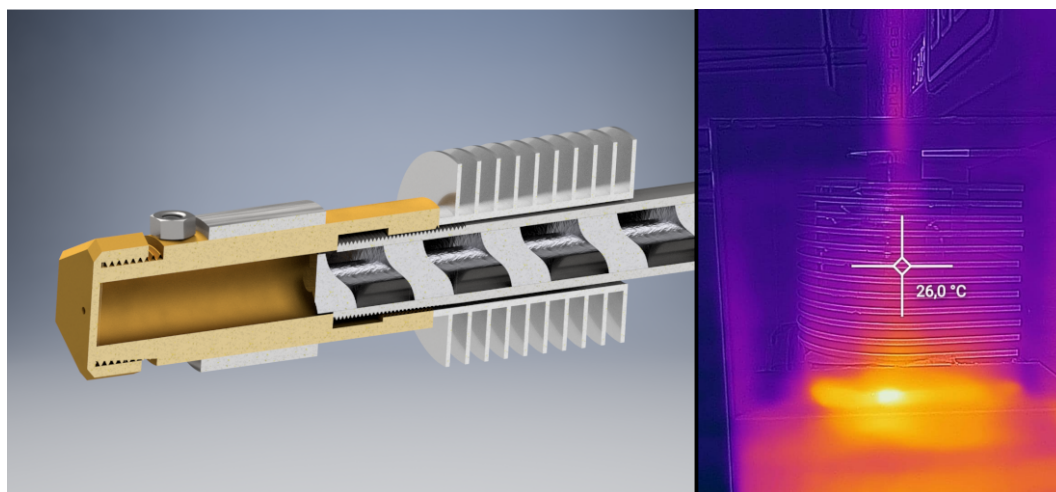
HotEnd

Důležitým požadavkem na návrh tavicí zóny byla vyměnitelnost trysek. Kvůli vlastnostem vedení tepla, byla za materiál zvolena mosaz. Ta je jako základní polotovar poměrně drahá, tyč o průměru 30 mm a délce 100 mm vychází okolo 500 Kč. Hliníkové slitiny jsou na toto použití nevhodné. Prvním důvodem je otěr jeho oxidů a kontaminování filamentu, druhým je vysoký součinitel tření. V případě, že bych neměl k dispozici kus vhodné mosazi navíc, bylo by tělo hotendu z oceli a pouze tryska by byla mosazná. Pro výrobu trysek je prověřeným polotovarem mosazné víčko pro rozvody vody. Mezi tuto trysku a tělo jsou umístěny nerezové sítky, viz obr. 22,

s rozměrem ok $0,45 \times 0,45 \text{ mm}$. Aby bylo zabráněno přenosu tepla směrem k zásobníku, navazuje na hotend hliníkový chladič. V tomto uspořádání není měřena teplota polymeru, ale mosazné části, do které je vyvrtáno zahloubení. Z obrázku 23 je patrné její umístění v místě navařené matice.



Obr. 22: Sítka.



Obr. 23: Vlevo řez hotendem, vpravo záběr z termokamery na chladič

3.1.2 Navíječ

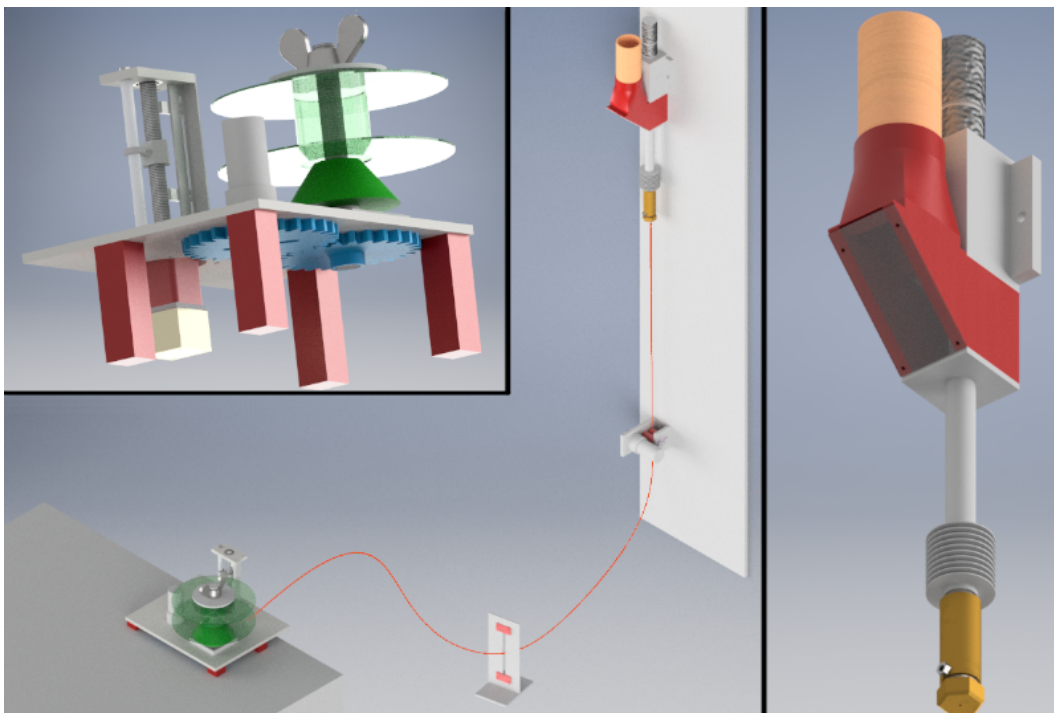
Přestože lze úspěšně vyrábět filament i bez navíjecího zařízení, jeho přítomnost zvyšuje kvalitu produkované struny.

Návrh Mk.1

První návrh, viz obr. 24, se skládal z pohonu cívky a posuvu průvlaku na jednom modulu, který měl být umístěný na stole. Dále senzoru filamentu², umístěném na zemi alespoň 1 metr od stolu a 1 metr od nástěného modulu, na kterém měl být umístěn nucený chod filamentu a samotný extruder. Toto uspořádání by zabíralo

² Nejednalo se o senzor průměru filamentu, ale pouze jeho přítomnosti, kdy podle výšky oblouku mělo být spínáno a vypínáno navíjení.

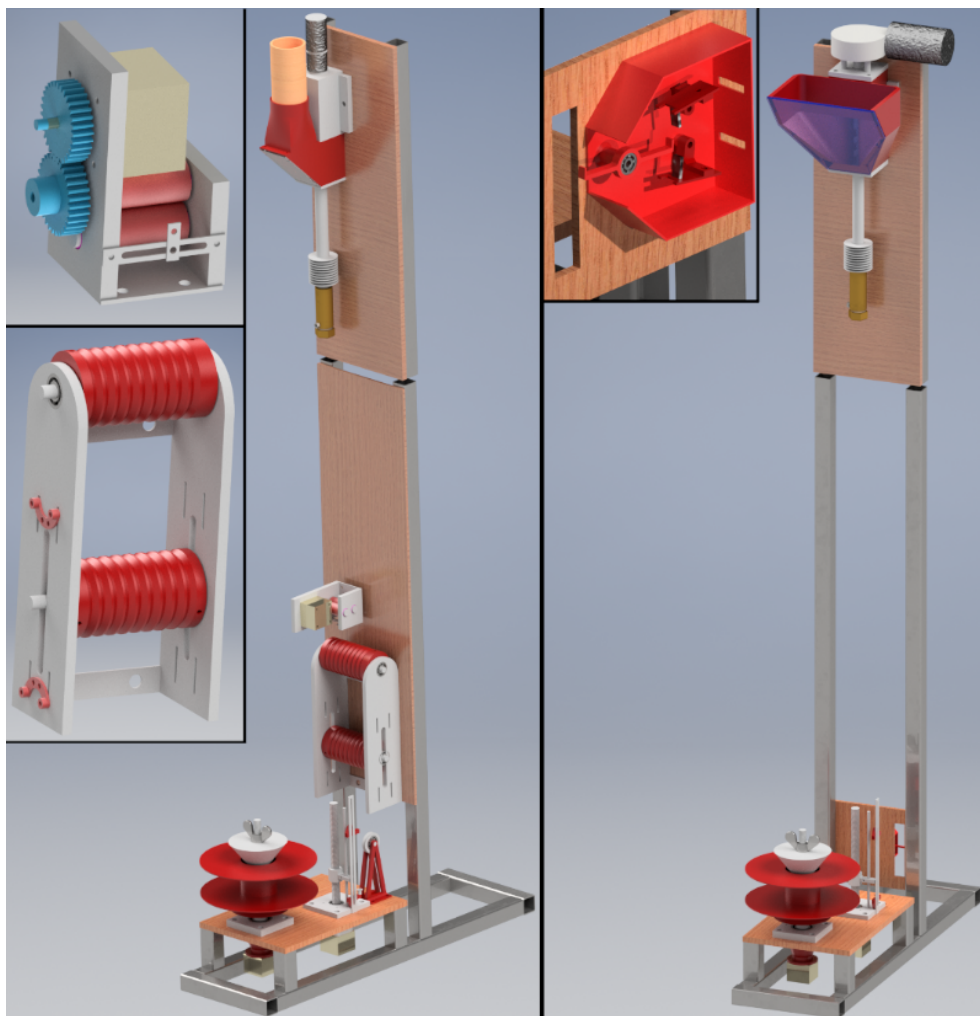
značný prostor a mělo své specifické nároky na úspořádání místnosti, kde mělo být provozováno. Průměr měl být řízen pomocí nuceného chodu. Z extruderu měl být vytlačován filament o \varnothing 2,2 mm a následně měl být vytahován tak, aby se výsledný průměr blížil 1,75 mm.



Obr. 24: První varianta zařízení, vlevo detail navíječe, vpravo detail extruderu.

Návrh Mk.2

Postupně byl návrh přepracován na kompaktnější dvoumodulové zařízení na jedné konstrukci, viz obr. 25 vlevo. Senzor filamentu byl přemístěn k navíječi a byl spojen s novým prvkem kompenzátoru. Ten měl za úkol akumulovat strunu a vytvořit přestávky mezi navíjením tak, aby se nemusela synchronizovat rychlost navíjení v závislosti na navíjecím průměru a rychlosti extruze. Navíc by umožňoval pohodlnou výměnu cívky. Průměr byl stále v plánu řídit pomocí nuceného chodu filamentu. Kompenzátor byl vyroben v několika iteracích vývoje, viz obr. 26, ukončeného funkčním řešením, které je pro takto kompaktní řešení nepoužitelné. Filament není v nuceném chodu dostatečně fixován a pohyb v kompenzátoru ovlivňuje extruzi nad přijatelnou mírou. Hlavním problémem během vývoje bylo příliš velké tření filamentu, který byl v devíti navazujících smyčkách navinut na válcích kompenzátoru. Byly vyrobeny kovové válce, které výrazně snížily tření. Nedosáhlo se ale funkčnosti, protože problém nebyl v povrchu, ale v kinematice pohybu filamentu. Při změně vzdálenosti válců se jednotlivé smyčky pohybovaly rostoucí rychlostí. Další iterace měly oddělené drážky na ložiscích. Tím se dosáhlo funkčnosti, ale pořád docházelo k ovlivňování extruze. Další vývoj byl přerušen.



Obr. 25: Vlevo druhá varianta, nahoře detail nuceného chodu a dole kompenzátoru. Vpravo finální varianta návrhu, vpravo detail na senzor filamentu.



Obr. 26: Vyrobené varianty kompenzátoru.

Návrh Mk.3

Poslední návrh, viz obr. 25 vpravo, je ochuzen o nucený chod i kompenzátor. Průměr struny je řízen pomocí průměru trysky, teploty a rychlosti motoru extruderu. Senzor pro navíjení filamentu byl umístěn na spodní část konstrukce. Změn se dočkal i extruder, především v oblasti násypky. První varianta neměla dostatečně šikmé stěny a v případě, že granulát dosahoval méně než poloviny výšky průhledné části, bylo potřeba ho ručně přeskupit. Když by nedošlo k zásahu obsluhy došlo by k vzniku trychtýře, a přestože by se mohlo z dálky zdát, že je granulátu v zásobníku ještě dost, nedocházelo by k další extruzi.

Průvlak

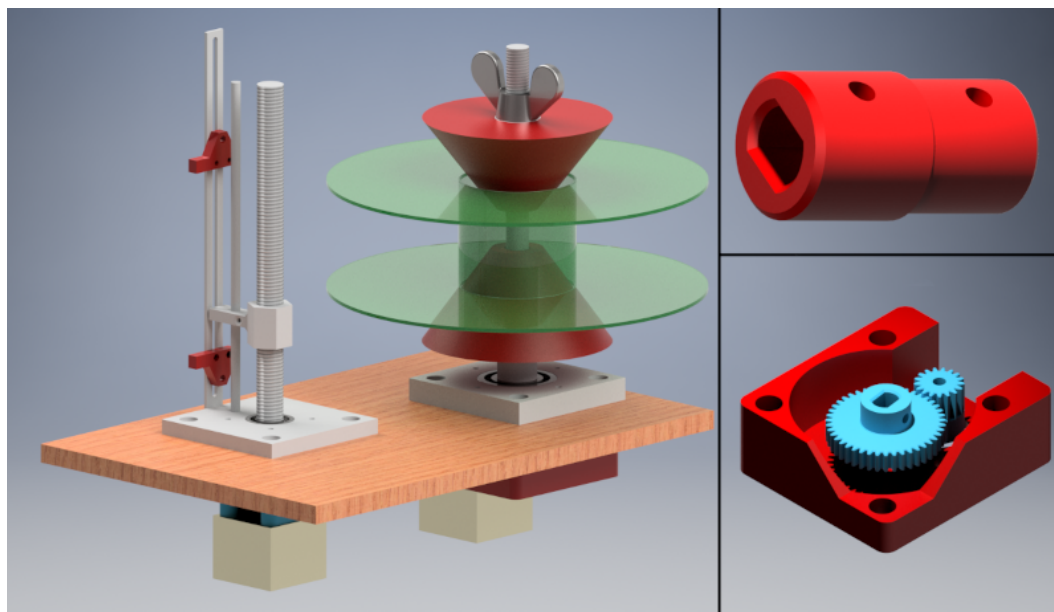
Oblastí sporu mnoha diskuzí mezi uživateli 3D tisku, je kvalita návínu a možnost zauzlování. Pokud tiskař nebo zaměstnanec neudělají tu chybu, že pustí volný konec návínu, která se následně zauzluje, není vznik uzlu v průběhu návínu možný. Při navíjení bez nasměrování struny ale může docházet k jejímu posunu na cívce a přeložení dřívějších vláken přes sebe. Pokud se následně struna utáhne, nemusí mít extruder dostatečnou sílu k jejímu vytržení. Dojde k přeskokování podávacích kol extruderu, případně obrobení filamentu tak, že extruder jej není schopen dále podávat. V obou případech dojde k přerušení tisku. Průvlak, viz obr. 27, byl navržen tak, aby během řízení nedocházelo k výpočtu pozice. Místo toho vždy po jednom otočení cívky dojde k posuvu průvlaku o jeden průměr filamentu. Směr pohybuje je obrácen pomocí koncových senzorů. Ty mají nastavitelnou pozici podle rozměrů cívky. Pohon je řešen pomocí krokového motoru, který je přímo spojený s hřídelí průvlaku vytištěnou spojkou.

Cívka

Otáčení cívky je realizováno přes převodovku na obr. 27. Původně byl navržen přímý převod, ale po přidání senzoru průměru filamentu nebyl výkon dostatečný, aby překonal zvýšené tření a docházelo ke ztrátě kroku. Přenos kroutícího momentu mezi hřídelí a cívkou je přes kužely, které umožňují použít širokou škálu cívek. Styk je třecí jak mezi cívkou a kužely, tak mezi kužely a hřídelí. Smyslem bylo umožnit protočení v případě, že dojde k závadě na zařízení. Pokud například dojde k extruzi o větším \varnothing než 1,9 mm dojde k jeho zaseknutí v průvlaku a v případě dalšího navíjení by mohlo dojít k poškození dalších částí stroje.

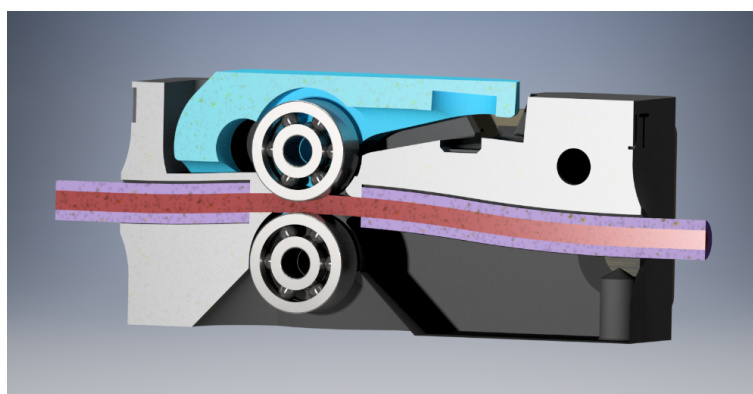
3.1.3 Senzor průměru

Většina zařízení umožňující kontinuální měření průměru začíná na několika tisících korun. Ať už se jedná o opravená digitální posuvná měřítka s výstupem přes sériovou linku, digitální mikrometry nebo laserové a optické senzory. V době ná-



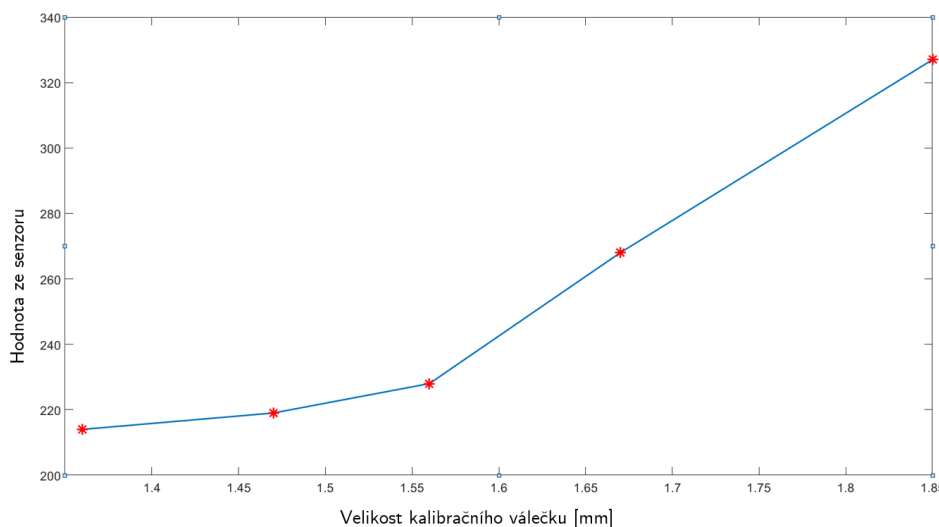
Obr. 27: Finální varianta návrhu navíječe, nahoře detail na spojku průvlaku, dole na převodovku pohonu cívky.

vrhu stroje byl publikován [54] OpenSource projekt na měření filamentu InFiDEL³ využívající Hallova senzoru a vzdálenosti magnetu pro určení průměru. Princip je zřejmý z obrázku 28. Místo doporučené výroby tištěného spoje na míru bylo použito modulu Hallova senzoru KY-024. Pro něj byly naměřeny hodnoty různých průměrů vrtáků a vybrána oblast s téměř lineární závislostí, viz obr. 29. Její krajní body byly použity pro konstanty lineární aproximace, ze které procesor dopočítává průměr. Rozlišení senzoru je 0,003 mm s přesností $\pm 0,03 \text{ mm}$, kvůli tomu je zavedena filtrace s klouzavým průměrem přes posledních 8 vzorků.



Obr. 28: Řez tělem senzoru průměru filamentu.

³ InFiDEL - Inline Filament Diameter Estimator (lowcost).



Obr. 29: Kalibrace senzoru průměru filamentu.

3.1.4 Řízení

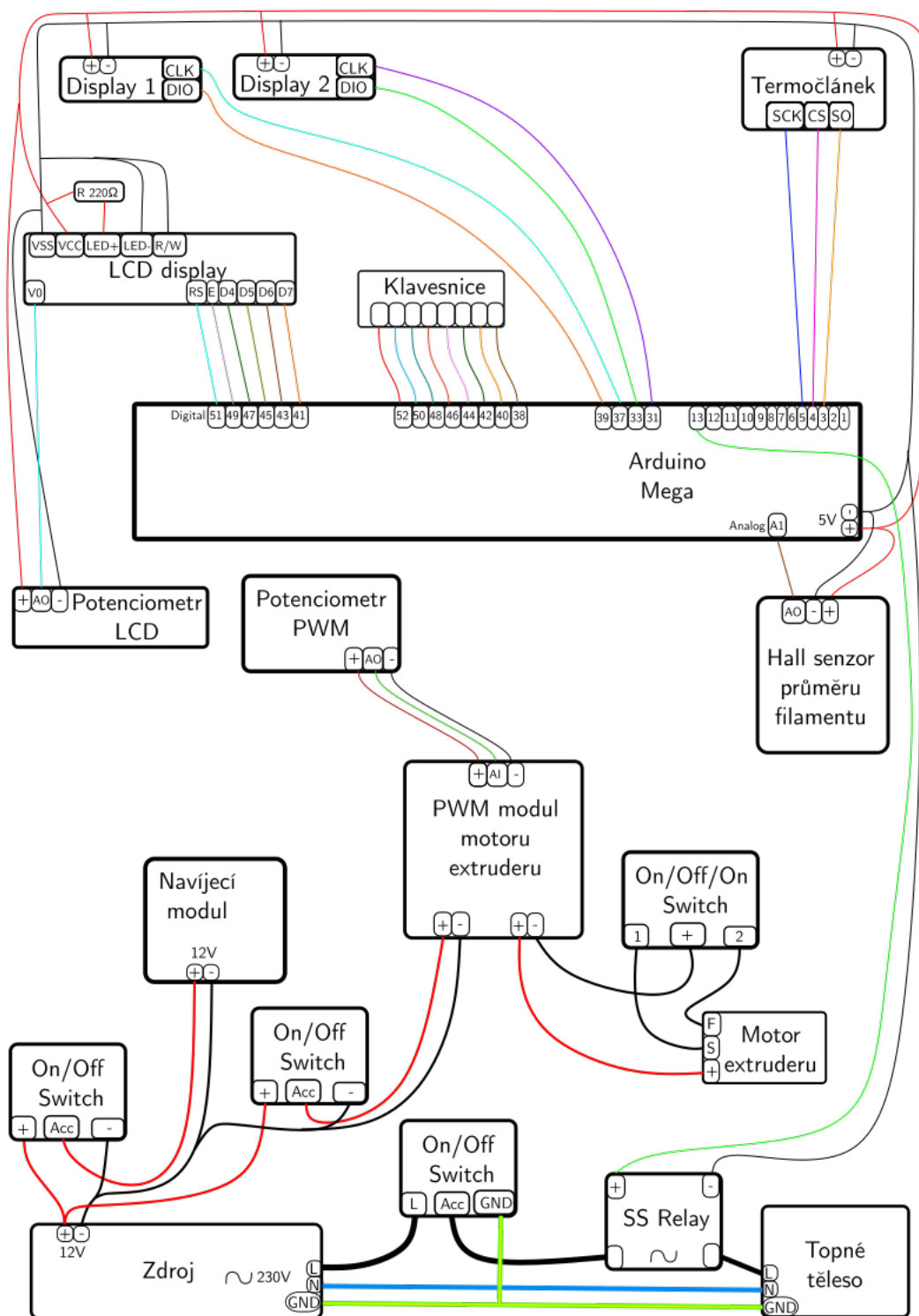
Řízení stroje je řešeno dvěma samostatně fungujícími částmi. První, postavená na Arduino MEGA, má za úkol řídit extruzi a zobrazovat data. Druhá, postavená na Arduino UNO, má za úkol řídit navíjení.

Řízení extruze

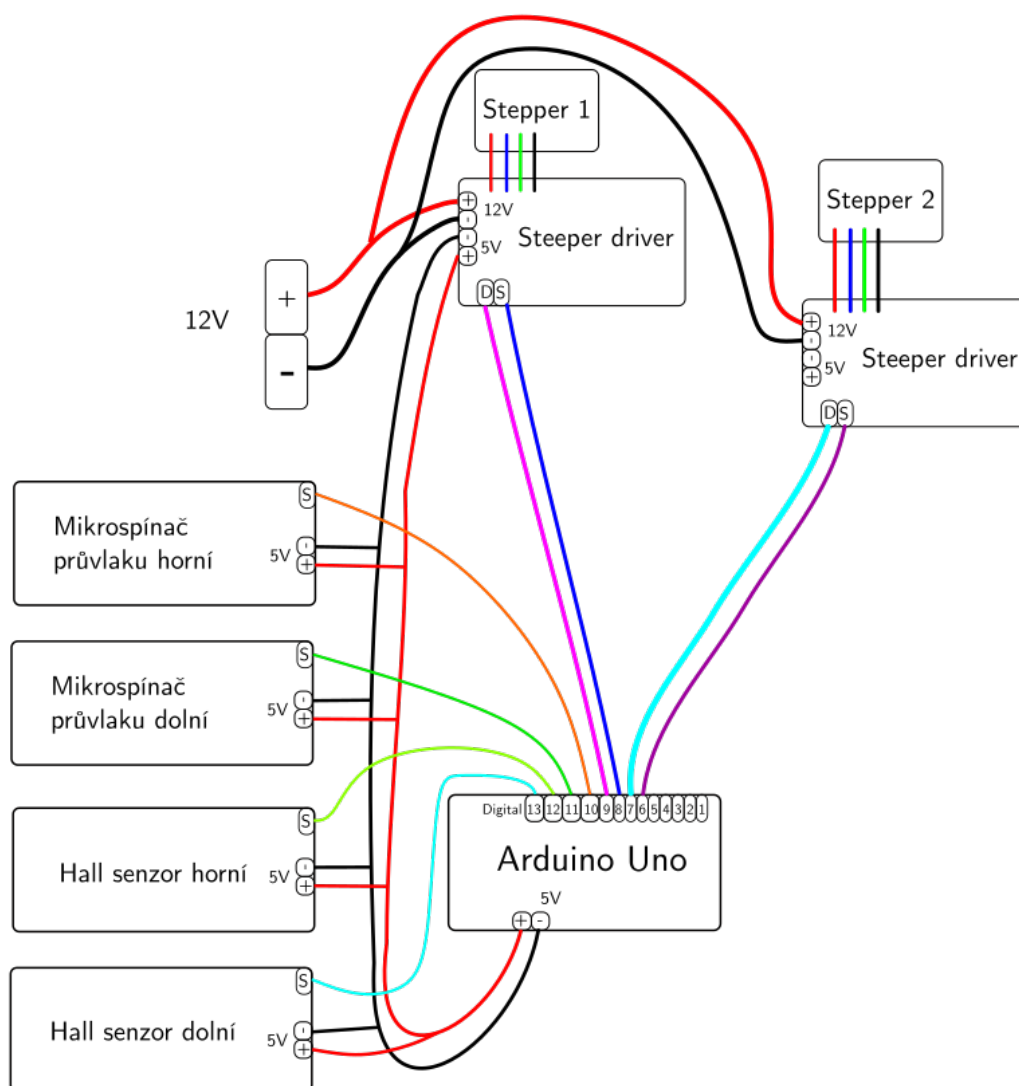
Zapojení je schématicky zobrazeno na obr. 30, kód je v příloze B. Teplota je čtena pomocí termočlánku typu K, výstup je překládán modulem MAX6675. Nevýhodou tohoto řešení je rozlišení 0,25 °C a přesnost měření $\pm 1,5$ °C. To způsobuje problémy PID regulátoru teploty, pro který je výstup příliš rozkmitaný. Je tedy třeba použít filtr klouzavého průměru s 16 vzorky. V době kdy jsem zařízení objednával, se mi nepodařilo najít alternativu, která by byla skladem, zvládala požadovaný teplotní rozsah a nestála tisíce korun. Vhodným kandidátem je například termočlánek PT 100 s převodníkem MAX31865. Topné těleso je řízeno pomocí délky okna sepnutí a dochází tedy i k několika sepnutím za vteřinu. Pro spínání muselo být použito bezkontaktní relé. Výpočet životnosti obyčejného relé vycházel pod 27 dnů provozu. Otáčky pohonu extrudérů jsou řízeny pulzní modulací napájení.

Řízení navíjení

Zapojení je schématicky zobrazeno na obr. 31, kód je v příloze C. Obsahuje zajímavou funkci adaptivního řízení rychlost navíjení. Ta by v ideálním případě udržovala obvodovou rychlost v rovnováze s rychlostí extruze probíhala by po celou dobu návinu. Bylo zvoleno zjednodušení a místo rychlosti se hlídá doba navíjení. Pokud je kratší než 30 vteřin dojde v příštím cyklu ke zpomalení navíjení. Ke zrychlení dojde, pokud je doba delší než 60 vteřin.



Obr. 30: Schéma zapojení Arduina MEGA.



Obr. 31: Schéma zapojení Arduino UNO.

3.2 Výroba

Všchny díly, kromě pálených na laseru a těla hotendu, jsem vyráběl sám. Tělo jsem nebyl schopen vyrobiť kvůli absenci vhodných nožíů. Všechny tištěné díly byly vytištěny na tiskárnách Ender 3 PRO z materiálu PLA Nebula Green Fluo. Celkem bylo vytištěno 2,4 kg filamentu, ale více než polovina byla použita při prototypování.

Konstrukce

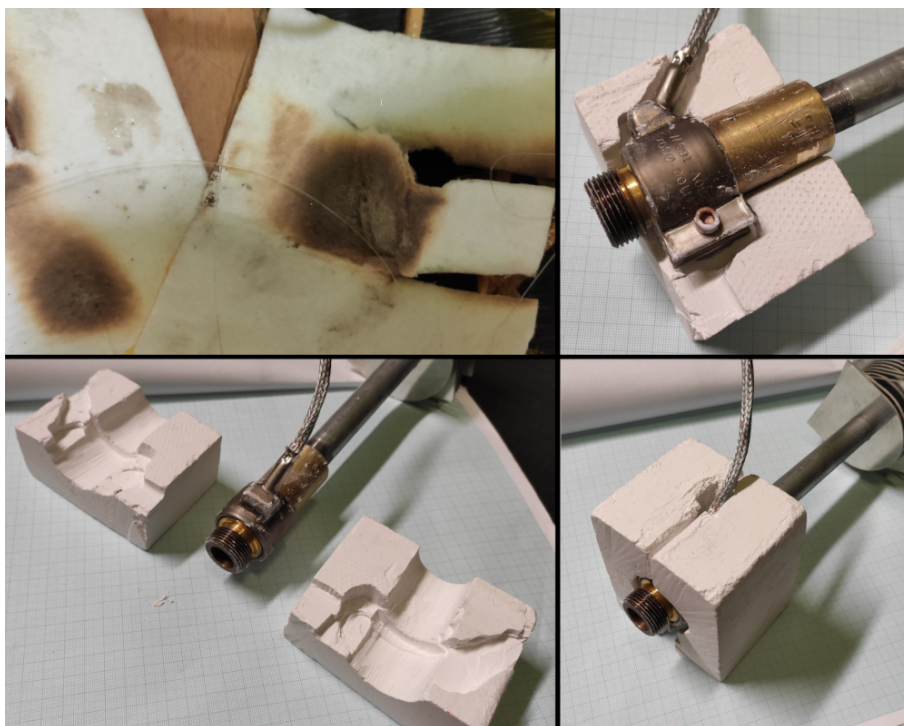
Základna je tvořena z nerezových profilů 50x25, na tu byl navařen kryt motorové sekce. Štelovatelné nožičky jsou uchyceny, tak jako mnoho dalších částí, pomocí nýtovacích matic. Základnu dotváří dvě stojny z profilů 40 × 40 mm a tloušťkou stěny 2 mm. Druhou sundávací část tvoří profily 35 × 35 mm a tloušťkou stěny 2 mm. Jsou spojeny přes 6mm HPL⁴ desku. Z přední strany desky je umístěn extruder a řídicí panel, zezadu veškerá zbývající elektronika. Stejná deska je použita i jako základní deska navíječe a další pro přichycení senzoru pozice filamentu. Protože se v horní části na straně elektroniky objevují prvky s napětím 230V je provedeno zakrytování lexanem. Díky volné horní a spodní straně nedochází ke kumulaci teplého vzduchu a přehřívání elektroniky. Na obrázku 34 je zobrazena konečná podoba zařízení. Hlaven je navařena na základnu extruderu, na kterou je postupně naskládáno tělo náspky, kovová příruba ložiska vrtáku, tištěný domek převodovky a kovový kryt ke kterému je uchycen motor. Všemi těmito částmi prochází čtveřice závitových tyčí, která celý extruder stahuje. Vnitřní povrch hlavně a těla hotendu byl leštěn, aby se snížil koeficient tření. Kvůli zvýšení efektivity vyhřívání, bezpečnosti a možnosti zařízení aspoň částečně zakrytovat, musel být hotend izolován. Skelné a minerální vaty mají maximální trvalou teplotu⁵ použití 200 až 250 °C pro vyšší je potřeba použít technické izolace. První pokus s izolací pro dřevostavby a deklarovanou maximální trvalou teplotou 300 °C nedopadl, jak jde vidět z obrázku 32, moc dobře. Byla tedy použita deska *PROMASIL 950 KS*, která se používá jako izolace kolem kamen. Do ní byl vybroušen negativ hotendu a v této variantě již stroj funguje dobře.

3.2.1 Ovládací panel

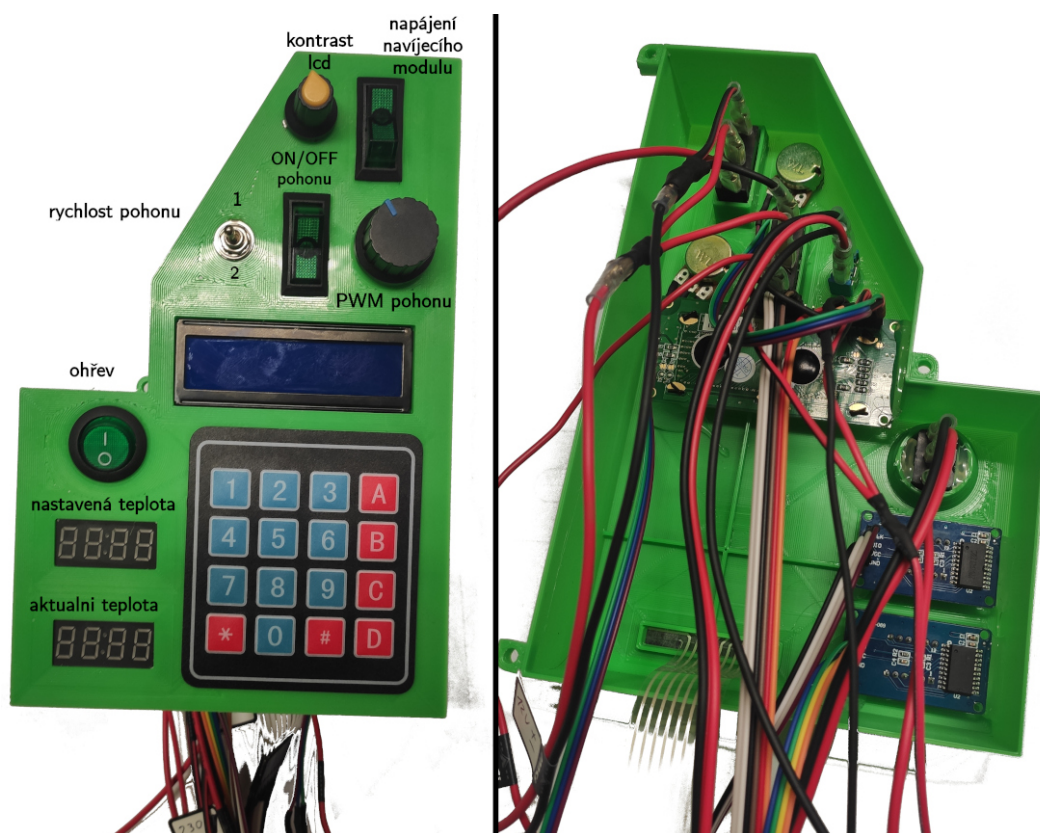
Ovládání stroje ze začátku probíhalo přes přepisování kódu a kontrolou pomocí výpisu na seriový port. Což je nepříjemné hlavně kvůli nutnosti restartu zařízení. Pro větší komfort ovládání byl vyroben ovládací panel viz obr. 33. Ten plně nahradil běžně prováděné úkony ovládání a přes seriový port probíhá pouze zaznamenávání dat z průběhu výroby. Na panelu lze vidět aktuální a cílovou teplotu a průměr filamentu. Tři On/Off vypínače spínají topné těleso, motor extruderu a navíječí

⁴ High Pressure Laminate.

⁵ Vlákno samotné je odolné teplotám až do 550 °C, limitujícím faktorem jsou pryskyřice, které jsou použity jako pojivo.



Obr. 32: Vlevo nahoře zničená izolace pro dřevostavby. Zbývají izolace pro kamna.



Obr. 33: Čelní a zadní strana ovládacího panelu se zapojenými kabely.

modul. On/Off/On spínač slouží k přepínání základní rychlosti stěračového motorku. Přes klávesnici lze změnit cílovou teplotu v rozsahu 150 až 250 °C. Zbylá tlačítka jsou prozatím nevyužita.

Postup pro změnu teploty

- Stiskem '*' se dostaneme do modu pro zapisování teplota. Na displeji s cílovou teplotou se objeví nápis Set.
- Pomocí číslic zadáme novou teplotu. Zadávaná teplota se objevuje na displeji s cílovou teplotou.
- Volbu potvrdíme stiskem 'A'. V případě, že teplota byla v povoleném rozsahu, dojde k jejímu nastavení. Pokud byla zadána hodnota mimo rozsah, objeví se nápis err.
- Pokud chceme volbu zrušit můžeme kdykoliv zmáčknout 'D', čímž dojde k návratu na poslední zadanou teplotu.

3.3 Výroba filamentu

3.3.1 Kde koupit granulát

Problém nákupu granulátu, je mnohem víc evropskou záležitostí. V USA jsou běžně k dostání i balení menší než 1 kg. Navíc každá firma zabývající se výrobou extruderů má v nabídce granuláty za značně navýšené ceny. Vyjímkou je firma Filastruder, která má granulát v nabídce za téměř velkoobchodní ceny. V Evropě jsem našel pouze dva obchody⁶, které prodávaly granulát. Německý 3ddeliver.de [55], s cenou za kilogram přes 320 Kč a slovenský e-shop www.profi-filaments.sk [56], který měl v nabídce pouze PLA Ingeo 4043D za 210 Kč za kg. Slovenská firma navíc měla skladem nejspíš jen 3 kg, neboť od mého nákupu 12. 4. 2021 udávají dostupnost pouze na objednávku. Jak jsem s testováním pokročil a ověřil jsem si základní funkčnost, rozhodl jsem se oslovit firmu Resinex [57], která se zabývá velkoobchodem plastových polotovarů. Poptával jsem 25 kg balení PLA, PET-G a ABS. Žádal jsem o cenovou nabídku jak na materiály přímo určené na tiskové struny tak na materiály pro vstřikolisy s vhodnými vlastnostmi. Na většinu poptávaných materiálů přišla zamítavá odpověď, nejmenší možné množství bylo v oktabínách (750 kg). V případě PET-G bylo nejmenší balení big bag (1100 kg). U ABS bylo možné získat 25kg balení materiálu s trochu horšími vlastnostmi pro extruzi struny, ale dlouho čekací dobou kvůli dopravě z centrálního skladu. Jediný ihned dostupný materiál byl PLA Ingeo 4043D v 25 kg balení.

⁶ Další jsem našel ve Velké Británii, ale kvůli Brexitu a možným problémům s clem a dopravou jsem je dále neuvažoval.

3.3.2 Vlastní výroba

První filament byl vyráběn na první verzi extruderu. Přibližně 150 g granulátu bylo spotřebováno na úvodní testování, kdy se ve filamentu nezávisle na teplotě tvořily bubliny, byl křehký a zcela nepoužitelný. Jednalo se o vysokou vlhkost vstupního materiálu. Další granulát byl vysušen v upravené sušičce na ovoce, viz obr. 35, ve které jsou sušeny filamenty. Byl použit stejný postup jako u sušení filamentů, tedy 4 hodiny při 45 °C. Takto sušený granulát vykazoval malé známky zlepšení, ale pořád nebyly výsledky použitelné. Po nahlédnutí do technického listu materiálu byly hodnoty sušení změněny na 5 hodin při 75 °C. Poté již byly výsledky stran vlhkosti výborné.

Vlhkost filamentu se empiricky testuje takzvaným "snap testem", při němž se chytí struna do jedné ruky a pomocí palce a prostředníčku se začne ohýbat kolem ukazováčku. Pokud praskne, je příliš vlhký, naprasknutí je hraniční stav. Za dobrý se dá považovat až stav, kdy dojde pouze k ohnutí, viz. obr.36. Pokud je granulát po vysušení ponechán na volném přístupu k vzduchu, začne se zvýšená vlhkost projevovat už za 24 hodin. Jak je patrné z fotek, v testovací místnosti je i akvárium, které zvyšuje vlhkost vzduchu. Relativní vlhkost vzduchu kolísala během dne mezi 40 a 60 %.

Při testu výroby plné špulky byla vyzkoušena i výměna za další během chodu stroje. Výměnu lze provést v klidném tempu, případně pokud by se stroj podařilo odladit za vyšších rychlostí, bylo by možné dočasně zpomalit a po výměně a návratu k původní rychlosti filament o metr a půl zakrátit. Než bylo dosaženo dostatečné spolehlivosti, aby byla vyrobena celá 1 kg cívka, vzniklo mnoho odpadu. Ze začátku bylo potřeba část i dobrých kusů vyhodit, protože by mohly obsahovat kovové třísky z obrábění. Na úvodní testování bylo spotřebováno 1,4 kg granulátu. Finální podoba je zahycena na obr. 34

3.4 Měření

V rámci vyhodnocování stroje se měřily následující parametry: průměr, teplota, spotřeba, produkce.

3.4.1 Průměr a teplota

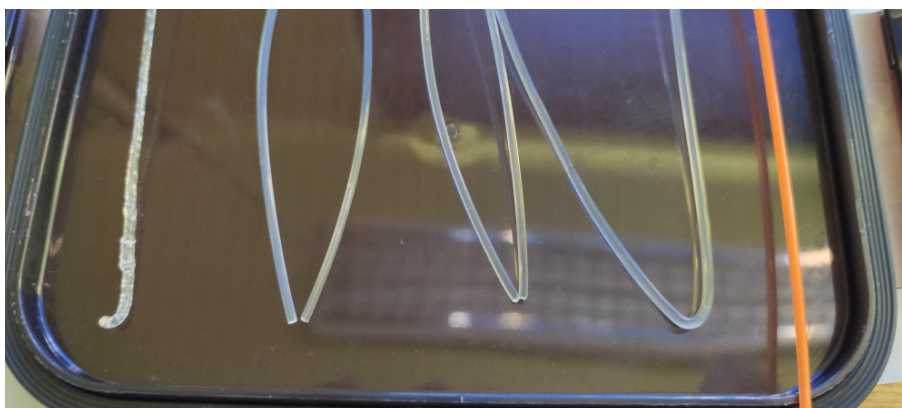
Zpočátku probíhalo měření průměru pomocí digitálního posuvného měřítka v pravidelných intervalech a postupně bylo nahrazeno průběžným měřením pomocí InFiDEL senzoru. Data byla zachytávána a zobrazována v reálném čase pomocí programu



Obr. 34: Finální podoba stroje.



Obr. 35: Vlevo upravená sušička na ovoce, vpravo nahoře první 1kg návin, dole běžný testovací.



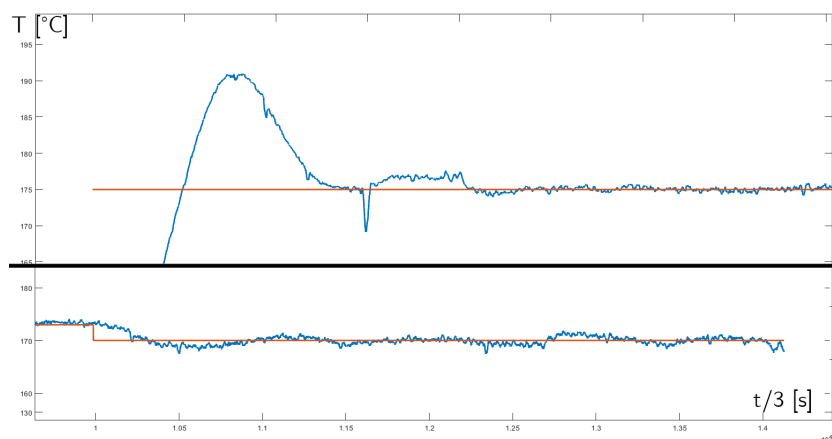
Obr. 36: Zleva nevysušený filament, filament po hodině sušení na 75 °C, po 3 hodinách, po 5 hodinách sušení a test barvení vyráběné struny pomocí nastříhaného komerčního filamentu.

MegunoLink⁷. Z naměřených hodnot je patrný rozptyl průměru při ustalené teplotě a jeho ovlivnění změnou teploty, viz obr. 37 a 38.

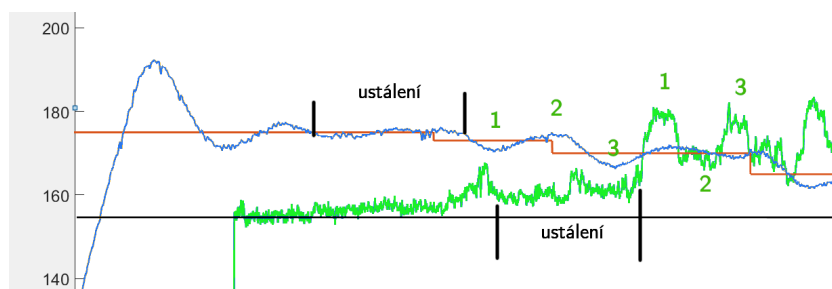
Na obrázcích lze vidět překmit, který vznikne během spouštění. Běžná doba pro dostatečné prohřátí OpenSource Extruderů se udává okolo 30 minut. U tohoto stroje dochází k ustálení do 15 minut. Neznámou, pro možné porovnání hodnot, je součinitel bezpečnosti, který uživatelé pro nahřívání volí. Nejdůležitějším výstupem těchto měření⁸ je zjištění přesnosti výroby a nutnosti velmi stabilní teploty, pro

⁷ První volbou byl program MATLAB, ale notebook, který sem na měření používal, je na něj příliš slabý.

⁸ Celkem bylo provedeno několik hodin měření, ale zde jsou pouze krátké, několik desítek minut trvající výřešky.



Obr. 37: Modře je zaznačena aktuální teplota, oranžově nastavená teplota. Na horní polovině je překmit po náběhu systému a následné ustálení. Dole je vidět ustálení po malé změně nastavené teploty.



Obr. 38: Zeleně je zaznačen průměr filamentu, černě spodní hranice rozsahu snímání. Je patrné provázání změny teploty a průměru. Jsou vyznačeny oblasti ustálení, kmitů a jejich časový posun.

přesnou výrobu. Při testování byla většinu času snaha produkovat rychlostí 60 cm za minutu, což odpovídá 110 g za hodinu. Při té produkci se ze začátku dařilo vyrábět použitelné pouze několik metrové úseky. Ty byly přušeny příliš velkým nebo malým průměrem. Použitelná část měla průměr 1,6 mm⁹ s odchylkou $\pm 0,8$ mm z těchto kusů vznikly první tisky viz. obr 39.

3.4.2 Tisk

Postupným laděním se prodlužovala délka užitečné části, jak jde vidět na obrázku 40. Postupně došlo také k zlepšení odchylky na $\pm 0,7$ mm. Byly vytištěny i testovací

⁹ Tiskárna nepotřebuje přesně průměr 1,75 mm, ve Sliceru se nastaví skutečná hodnota a tiskárna poté funguje správně i s jiným průměrem. Samozřejmě jsou dva fyzikální limity, kterými je průměr omezen. Dolní limit je vzdálnost, který je mezi podávacími koly extruderu a horní je stanoven prvkem s nejmenším vnitřním průměrem, kterým filament prochází. U tiskárny Ender 3 jsou tyto limity 1,48 mm a 1,89 mm. Snaha pohybovat se blíže dolním limitům je snahou ochránit tiskárnu před poškozením.

hranolky jak vyrobeného, tak koupeného filamentu, které byly následně lámány, ale pouze v ruce. Mezi výtisky nebyl žádný zjevný rozdíl. Ten naopak byl při přilnutí první vrstvy. To je natolik dobré, že nemohl být používán 3D LAC, protože výtisky nešly sundat ani po vychladnutí.



Obr. 39: První testovací tisky z úspěšně vyrobeného kusu bez kovových třísek.



Obr. 40: Postupný vývoj dokončení vázy, úplně vlevo vepředu je stejný váleček jako na předchozím obrázku. Dokončená váza vlevo vzadu má rozměry $160 \times 160 \times 150 \text{ mm}$ a bylo na ni použito 115 gramů filamentu.

3.4.3 Spotřeba a produkce

V průběhu extruze byla měřena spotřeba zásuvkovým Wattmetrem. Spotřeba je pevně svázána s produkcí. Při produkci 110 gramů za hodinu byla průměrná spotřeba 100 W. Pro test byla produkce bez ohledu na kvalitu zvýšena na 200 gramů za hodinu, na této hodnotě byla po ustálení držena přibližně 5 minut. Během této

doby se spotřeba zvýšila na 180 W. Přestože byla rychlost motoru dále zvyšována, nedocházelo ke znatelnému zvýšení produkce, pouze se zvýšila spotřeba na přibližně 200 W. Nejzajímavější na celém měření bylo, že při zdvojnásobení produkce nedošlo ke zhoršení odchylky, většinu času se dokonce držela v $\pm 0,05$ mm. Náhodou došlo k posunu průměru z 1,6 na 1,7 mm a i tato produkce je tak použitelná. Po dalším zvyšování se průměr posunul nad 1,8 mm a produkce byla přerušena. Zatím nebyl nalezen strop možností zařízení. Pokud by byla ještě více zvýšena teplota, mohlo by dojít k dalšímu pokroku v produkci. Při spotřebě elektrické energie ≈ 1 kWh na 1 kg vychází cena filamentu na méně než 250 Kč, v případě, že nakupujeme granulát v malém množství od přeprodejců. Cena je nižší než 180 Kč za kg, pokud nakupujeme alespoň 25kg pytle od přímých dodavatelů.

3.5 Seznam dílů a cen

v seznamu 4 jsou uvedeny pouze díly, které jsou použity na finálním kusu.

Tab. 4: Cena dílů

název	specifikace	cena [Kč]	poznámka
filament	PLA Nebula $\approx 1,2$ kg	600	
nerezové profily	40x40x2500, 35x35x2000, 50x25x2000	≈ 2500	z vlastních zásob, odhad ceny
stěračový motor	40 W původně pro Škoda Octavia	800	objednáno přes servis
PWM regulator	15 A	120	
HPL deska	1500x220x6 mm	≈ 750	z vlastních zásob, odhad ceny
topné těleso	DH400 D30x30	1200	
tělo hotendu	Výkres HotEnd	≈ 1200	odhad ceny, materiál jsem dostal darem, práce stála 600 Kč
mosazné víčko	SVISTRADÉ 3/4"301 F	75	
bezkontaktní relé	SSR-40DA	150	
PMMA deska	200x210x4 mm	≈ 20	z vlastních zásob, odhad ceny
výpalky ocel	cca 80x80x8, 7 ks	≈ 1000	darem, odhad ceny
výpalky hliník	90x70x2, 12 ks	≈ 200	darem, odhad ceny
izolace	Promasil 950 1000x500x40 mm	250	

Tab. 5: Cena dílů, pokračování

název	specifikace	cena [Kč]	poznámka
bezešvá hydraulická trubka	20x2x250 mm	200	
železářství	šrouby, nýtovací a lisovací matice,...	≈600	bez účtenek, odhad ceny
krokový motor	NEMA 17 HS 4401 (0,4Nm), 2 ks	640	
hadovitý vrták	16x460	220	
vývojové desky	klony Arduino UNO R3 a MEGA	650	
spínaný zdroj	MEAN WELL RS 150 W 12 V	740	
Hallův senzor	KY-024, 3 ks	90	
motor shield	shield pro budič krokových motorů, 2 ks	120	
driver pro krokové motory	DRV8825, 2ks	140	
ložiska	6004 1 ks, 6000 1 ks, 624, 1 ks, 623, 2 ks, PCMF 121407 E	190	pro kompenzátor bylo objednáno dalších 34 ks
ventilatory 12V	50x50x10, 1 ks, 60x60x10, 2 ks	640	pro chlazení filamentu/trysky, chladiče, motoru
termočlánek	typ k závit M6, včetně modulu MAX6675	150	
hodinový display	0,56"TM1637, 2 ks	40	
mikrospínač	Omron SS-5GL, 2 ks	50	
elektro	vypínače, kabely, fastony,...	600	
nepájivé kontaktní pole	ZY-170, 2 ks	20	

Tab. 6: Cena dílů, pokračování

název	specifikace	cena [Kč]	poznámka
display	LCD1602A	55	
membránová klávesnice	4x4	20	
granulát	PLA Ingeo 4043D 3 kg	815	
poštovné	6 ks	800	
celkem	pouze nakoupené části	10 835	
celkem	včetně vlastních zásob a darů	15 885	

4 ZHODNOCENÍ a DISKUZE

4.0.1 Problémy

Notebook

Stroj není zdaleka bezchybný, ale největší problémy způsoboval notebook, který byl používán na měření. Během několik dnů se z bezproblémové komunikace dostal do stavu, kdy pouhé připojení způsobí restart Arduina. Navíc dojde k okamžitému ovlivnění senzorů teploty a průměru filamentu v rámci procent. Dále dochází k nesmyslným skokům mezi hodnotami. Například ohřátí hotendu o desítky stupňů během vteřiny. Změna však nebyla skoková, ale průběžná. Kvůli tomu bylo spotřebováno spousta času při hledání příčiny ve stroji. Úvaha, že problém není ve stroji, byla ověřena dlouhodobým sledováním vypsaných hodnot na displejích stroje, bez připojeného notebooku.

Navíječ

Při výběru motoru pohonu cívky nebyl zohledněn odpor, který vyvine InFiDEL senzor. V době návrhu, ani nákupu neměl být umístěn na současné pozici. Kompaktnost celého návrhu nedovoluje jeho přemístění. Jelikož k problémům dochází až v úplném závěru navíjení, je jedním z možných řešení nenavíjet špulky doplna, ale pouze z 90 % kapacity. Dalším, nákladnějším řešením by byl nákup silnějšího motoru, případně vývoj vlastního, kompaktnějšího senzoru.

Senzory

Kvalita použitých senzorů teploty a průměru je na svoji důležitost značně poddimenzována. Jedná se o dva prvky, kde i malé zlepšení může přinést vysoký užitek.

4.1 Technické parametry stroje

Kapacita zásobníku zařízení je 1,4 kg granulátu PLA. Maximální provozní teplota hotendu je 300 °C. Stroj je schopen produkovat 110 gramů filamentu za hodinu s odchylkou $\pm 0,7 \text{ mm}$. Je vybaven automatickým navíječem cívek, jímž je schopný navinout až 0,9 kg. Průběžně je snímán průměr filamentu, a díky ovládacímu panelu je umožněno jednoduché ladění průměru.

4.1.1 Srovnání s jinými stroji

Příkonem se z komerčních zařízení nejvíce blíží Filabotu EX 2, ten má maximální produkci, ale i cenu, desetinásobně vyšší. Dosaženým výkonem se blíží Filastruderu, vůči kterému má čtyřnásobný příkon. Cenou jsou si stroje rovny. Filastruder ale dosahuje lepších výsledků v oblasti přesnosti, kdy někteří uživatelé hlásí až o polovinu

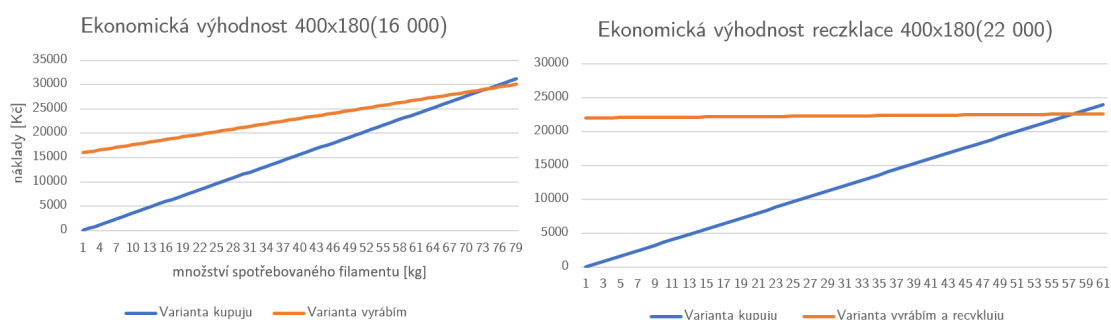
přesnější výrobu. Poslední srovnatelný komerční stroj je FelFil, který má totožnou produkci a o 0,01 mm horší udávanou přesnost.

Při srovnání s projektem Hugh Laymana dosahuje stroj poloviční produkce a stejné přesnosti. Podobně je na tom v porovnání s Recyclebotem, který dosahuje až 4× vyšší produkce při mnohem nižší spotřebě elektrické energie. Na rozdíl od 1 kW je potřeba pouze 0,24 kW.

Pouze z cenového hlediska se převážně díky konkurenci Filastruderu nedá mluvit o velkém úspěch, a pokud započítáme i ostatní OpenSource projekty, nachází se maximálně někde uprostřed. To je částečně dáno použitím drahých dílů, které byly většinou darovány a šly by jednoduše nahradit levnější variantou. Největší výhodu vidím v tom, kolik mi tato práce dala zkušeností. To je věc, která se s koupením a pouhým zprovozněním hotového zařízení nedá nahradit.

4.1.2 Ekonomická návratnost

Jak již bylo zmíněno v kapitole o produkci, lze se bez problému dostat na cenu pod 180 Kč za kg filamentu i po započtení ceny elektrické energie. Nejedná se o filament premiové kvality, a proto ho musíme srovnávat s těmi téměř nejlevnějšími. Díky absenci poštovního tedy budu srovnávat cenu 180 Kč za kg vůči 400 Kč za kg. Z grafu na obr. 41 je patrné, že výroba se díky vysokým pořizovacím nákladům stane výhodnou až po vyrobení 70-té cívky. V případě recyklace je stoupání křivky mnohem mírnější a překročení bodu equilibria nastane už u 60-té cívky. Model v sobě nezahrnuje náklady na opravy, které při produkci takového množství, budou jistě ppotřeba. Navíc model recyklace nezahrnuje vstupní materiál a další náklady na jeho třídění a přípravu. V případě jednotlivce se pravděpodobně bude jednat pouze o další koníček. Ale v rámci komunity nebo rozsáhlého projektu se může stát výhodným velice rychle.



Obr. 41: Vlevo je graf ekonomické rozvahy pro nákupu a výroby, vpravo nákupu a recyklace.

4.2 Možnost další práce

Jedním z cílů bylo stroj navrhnout tak, aby mohl být dále upravován a vylepšován. Kromě vylepšování technických parametrů a odstranění chyb stroje zmíněných výše se, je potřeba nalézt jeho limity. Dále by nebylo špatné vylepšit jeho uživatelskou přívětivost. Díky vzájemné komunikaci vývojových desek by mohlo být umožněno nastavovat a zobrazovat další zajímavé parametry navíjecího modulu.

5 ZÁVĚR

Práce se po krátkém úvodu do historie 3D tisku věnuje přelomovému projektu ReppRap, ze kterého vychází i myšlenka recyklace 3D tisků. Prochází běžně používané tiskové materiály, zmíní jejich použití, výhody a nevýhody. Definuje si proces recyklace běžného plastového odpadu. Popisuje vznik odpadů z FDM technologie. Zmíní firmy a projekty, které se věnují recyklaci plastů obecně, případně výrobě recyklováných filamentů. Prochází jednotlivé výzvy, které s sebou recyklace tisků přináší. Od třídění a čištění od možných kontaminantů, přes drcení domácími spotřebiči nebo specializovanými stroji. Ty mezi sebou porovnává a přechází k pro tuto práci nejdůležitější části, extruzi. Zběžně se věnuje obecným vlastnostem plastů, které jsou důležité pro výrobu struny. Popisuje ne zcela zřejmý jev otoku za tryskou. Projde celé cenové spektrum extruderu, od obrovských průmyslových strojů, přes drahá hotová řešení, až k velmi levným svépomocně zhotoveným projektům. V závěru této části shrnující poznatky jsou vyjmenovány důležité vlastnosti filamentu.

Následuje část věnována vlastnímu řešení, které začíná návrhem. Prochází základní osnovu, podle které byly navrhovány jednotlivé části extruderu, navíječe, senzorů a řízení. Možná právě proto je potřeba znovu připomenout, že se nejedná o jednosměrnou cestu, ale je potřeba se neustále vracet a přehodnocovat jednotlivé prvky. Krátce je popsána stavba a návod jak extruder ovládat, jaké jsou úskalí produkce nebo kde sehnat granulát, než bude možnost si vyrábět vlastní.

Předposlední část se věnuje měřením a dosaženým výsledkům, následuje tabulkový přehled dílů, které byly použity na stavbu finálního zařízení. Poslední kapitolou je zhodnocení, kde procházím největší problémy, které se strojem nastaly. Shrnuje nejdůležitější parametry, zejména schopnost stroje vyrobit celý kilogram filamentu o zvoleném průměru s odchylkou $\pm 0,7 \text{ mm}$ za přibližně 9 a půl hodiny, pokud budeme počítat i s přípravou stroje. Srovnává zařízení s ostatními zde zmíněnými modely a ukazuje cenovou návratnost.

Závěrem bych chtěl připomenout, že návrh nestojí na základech daných technologií za milióny, ale na ověřených alternativách, díky kterým je možnost přinést tuto technologii i na naši fakultu. Cílem nebylo navrhnout nejvýkonější a nejlepší stroj, ale první prototyp. Odrazový můstek, ze kterého půjde vybudovat celá technologie recyklace.

6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Hull, C. W.: *Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography*. Mar 1986, uS4575330.
- [2] První Kerns, J.: *3D Printing: The Machine that Started It All*. [online], 2017.
URL <https://www.machinedesign.com/3d-printing-cad/article/21835865/3d-printing-the-machine-that-started-it-all>
- [3] neznámý, A.: *The first FDM printer, the Stratasys 3D Modeler*. [online], 1992.
URL <https://www.sutori.com/item/untitled-ef94-d69e>
- [4] Jones, R.; Haufe, P.; Sells, E.; aj.: *RepRap – the replicating rapid prototyper*. *Robotica*, ročník 29, è. 1, 2011: str. 177–191, doi:10.1017/S026357471000069X.
- [5] Smith, B.: *A Quick Guide to GPLv3*. [online], 2007.
URL <https://www.gnu.org/licenses/quick-guide-gplv3.html>
- [6] *RepRap project*. [online], Feb 2021.
URL https://en.wikipedia.org/wiki/RepRap_project#cite_note-Jones,_R._2011-1
- [7] Carlota, V.: *Is PLA filament actually biodegradable?* [online], Apr 2021.
URL <https://www.3dnatives.com/en/pla-filament-230720194/#!>
- [8] Muniyasamy, S.; Ofosu, O.; John, M. J.; aj.: *Mineralization of Poly(lactic acid) (PLA), Poly(3-hydroxybutyrate-co-valerate) (PHBV) and PLA/PHBV Blend in Compost and Soil Environments*. *Journal of Renewable Materials*, ročník 4, è. 2, 2016: str. 133–145, doi:10.7569/jrm.2016.634104.
- [9] DeStefano, V.; Khan, S.; Tabada, A.: *Applications of PLA in modern medicine*. *Engineered Regeneration*, ročník 1, 2020: str. 76–87, doi:10.1016/j.engreg.2020.08.002.
- [10] [online].
URL <https://youtu.be/I9S4af-yYvw>
- [11] Hsiao, W.: *Creep: ABS, PLA PETG, and Alloy 910*. [online], Mar 2018.
URL <http://thrinter.com/creep-abs-pla-petg-alloy-910/>
- [12] *Safety Precautions*.
URL <https://www.captubes.com/safety.html>

- [13] Pehlić, E.; Šapčanin, A.; Nanić, H.; aj.: *The Content of Heavy Metals in “PET” Bottles of Drinking Water and Its Electrical Conductivity. Lecture Notes in Networks and Systems*, 2018: str. 552–560, doi:10.1007/978-3-319-90893-9_64.
- [14] Campanale; Massarelli; Savino; aj.: *A Detailed Review Study on Potential Effects of Microplastics and Additives of Concern on Human Health. International Journal of Environmental Research and Public Health*, ročník 17, è. 4, 2020: str. 1212, doi:10.3390/ijerph17041212.
- [15] *Pet: Bottle PET Filament*.
URL <https://bpetfilament.com/>
- [16] *Poptáváme a vykupujeme plastové materiály*. Mar 2020.
URL <https://www.ekomb.cz/poptavame/>
- [17] *Recycling plastics – Resource efficiency with an optimized sorting method*. Sep 2018.
URL https://youtu.be/I_fUpP-hq3A
- [18] *Co jste možná nevěděli o recyklaci IV - plasty*. Sep 2014.
URL <https://www.puruplast.cz/co-jste-mozna-nevedeli-o-recyklaci-iv-plasty/>
- [19] Kar: *Čína končí s dovozem odpadu. Způsobí to obrovský problém pro přírodu na celém světě*. Oct 2017.
URL <https://ct24.ceskatelevize.cz/veda/2284894-cina-konci-s-dovozem-odpadu-zpusobi-obrovsky-problem-pro-prirodu-na-celom-svet/>
- [20] *Soubory ke stažení*.
URL <https://www.ekokom.cz/cz/klienti/uzitecne-informace-pro-klienty/soubory-ke-stazeni-klienti>
- [21] Sedláková, A.: *VYUŽITÍ PLASTŮ PO SKONČENÍ JEJICH ŽIVOTNOSTI*. 2019.
- [22] Coppa, R.: *Skirt, brim o raft? Cosa sono e come utilizzarli al meglio*. Nov 2018.
URL <https://www.stampa3d-forum.it/articoli/guide/skirt-brim-raft-cosa-sono/>
- [23] V., C.: *Project PLA sets out to recycle your 3D printing plastic waste*. Oct 2019.
URL <https://www.3dnatives.com/en/project-pla-recycling-plastic-waste-281020195/#!>
- [24] *3D Printing Materials Zero Waste Box*.
URL https://www.terracycle.com/en-US/zero_waste_boxes/3d-printing-materials

- [25] Army, O.: *Precious Plastic - 3D printer Filament maker*. May 2016.
URL <https://www.youtube.com/watch?v=j85TPjYRezI>
- [26] Hakkens, D.: May 2016.
URL <https://davehakkens.nl/community/forums/topic/filament-maker-beta/>
- [27] *Precious Plastic Universe*.
URL <https://preciousplastic.com/index.html>
- [28] *Recyklované filamenty pro 3D tiskárny*. Mar 2020.
URL <https://www.ekomb.cz>
- [29] *Replay3D*.
- [30] Kreiger, M. A.; Mulder, M. L.; Glover, A. G.; aj.: *Life Cycle Analysis of Distributed Recycling of Post-consumer High Density Polyethylene for 3-D Printing Filament*. *SSRN Electronic Journal*, 2014, doi:10.2139/ssrn.3331165.
- [31] Podmanická, S.: *Syntéza a charakterizace Epoxy-Geo hybridních kompozitních systémů*. Dizertační práce, 2015.
- [32] Baraanker, G.; Flohil, J.; Tokaya, G.: *Developing a plastic recycling add-on for the RepRap 3D printer*. Dizertační práce, 2010.
URL <https://web.archive.org/web/20200211171744/https://reprapdelft.files.wordpress.com/2010/04/reprap-granule-extruder-tudelft1.pdf>
- [33] Laws, M.: *Recycling waste 3D prints with a Precious Plastics shredder*. Aug 2019.
URL https://www.youtube.com/watch?v=NL-k8kJ8yig&t=244s&ab_channel=MatthewWheelerMatthewWheeler
- [34] *Andy's Machines*.
URL [https://www.patreon.com/AndysMachines/posts?filters\[tag\]=Blueprint](https://www.patreon.com/AndysMachines/posts?filters[tag]=Blueprint)
- [35] *Comunity shredder1*.
URL <https://onearmy.github.io/academy/assets/Build/community/communityshredder1.jpg>
- [36] *Shred IT*. Feb 2021.
URL <https://3devo.com/product/shr3d-it/>

- [37] Harpner, C.: *Modern Plastics Handbook*. McGraw Hill Professional, 2000, ISBN 0-07-026714-6.
- [38] *Materials and their Flow Properties*. 2012.
URL https://www.dynisco.com/userfiles/files/Materials_and_Flow_Properties.pdf
- [39] *Extruzní linka na výrobu strun - filamentu*.
URL <https://www.boco.cz/extruzni-linka-na-vyrobu-strun>
- [40] *Meet the Composer and Precision - Desktop Filament Makers*. Mar 2021.
URL <https://3devo.com/filament-makers/>
- [41] *Filabot EX6 Extruder Setup*.
URL <https://www.filabot.com/products/ex6-bundle>
- [42] *ProtoCycler+*.
URL <https://redetec.com/products/protocycler>
- [43] Oosterman, D.: *ProtoCycler: Free, Sustainable 3D Printer Filament*. Dec 2014.
URL <https://www.indiegogo.com/projects/protocycler-free-sustainable-3d-printer-filament#/>
- [44] *Filastruder Kit*.
URL <https://www.filastruder.com/collections/filastruders-accessories/products/filastruder-kit?variant=338125655>
- [45] McCracken, H.: *How an 83-Year-Old Inventor Beat the High Cost of 3D Printing*. Mar 2013.
URL <https://techland.time.com/2013/03/04/how-an-83-year-old-inventor-beat-the-high-cost-of-3d-printing/>
- [46] Lyman, H.: *Hugh Lyman Thingiverse Page*.
URL <https://www.thingiverse.com/hlyman/designs>
- [47] Lyman, H.: *Hugh Lyman Youtube Chanel*.
URL <https://www.youtube.com/channel/UCFM-L-WBCMpOvqRfnnKrSGQ>
- [48] *Recyclebot*.
URL <https://www.appropedia.org/Recyclebot>
- [49] *Felfil Filament Maker: Make your own 3D printing filament with Felfil Evo*. Oct 2020.
URL <https://felfil.com/>

- [50] Zaldivar, R.; McLouth, T.; Ferrelli, G.; aj.: *Effect of initial filament moisture content on the microstructure and mechanical performance of ULTEM® 9085 3D printed parts. Additive Manufacturing*, ročník 24, 2018: s. 457–466, ISSN 2214-8604, doi:<https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.10.022>.
URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860418304779>
- [51]
- [52] Svoboda, M.: *Milton Friedman citát 267396*. 2020.
URL <https://citaty.net/citaty/267396-milton-friedman-existuji-ctyri-zpusoby->
- [53] Šticha, P.: *Katalog tryskových topných těles*.
URL http://www.technotrend.cz/_katalog/1_Topna_telesa.pdf
- [54] Sanladerer, T.: *InFiDEL - Inline Filament Diameter Estimator (lowcost)*. 2021.
URL <https://www.prusaprinters.org/cs/prints/57154-infidel-inline-filament-diameter-estimator-lowcost/files>
- [55] Hermann, T.: *Granulat*.
URL <https://3ddeliver.de/granulat/>
- [56] *Masterbatches*.
URL <https://www.profi-filaments.sk/c/masterbatches>
- [57] *Produkty*.
URL <https://www.resinex.cz/produkty/>
- [58] Hermann, S.: *Recycle your failed 3D prints! Make new filament at home*.
URL https://youtu.be/vqWwUx8l_Io
- [59] Laws, M.: *Recycle waste 3D prints: Part 1 - Shredding and melting*.
URL https://youtu.be/8HVjUGZM_cQ
- [60] Woern, A. L.; McCaslin, J. R.; Pringle, A. M.; aj.: *RepRapable Recyclebot: Open source 3-D printable extruder for converting plastic to 3-D printing filament. HardwareX*, ročník 4, 2018: str. e00026, ISSN 2468-0672, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2018.e00026>.
URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468067218300208>

8 SEZNAM OBRÁZKŮ

1	První SLA tiskárna SLA-1 [2] a první FDM tiskárna Stratasys 3D Modeler [3].	17
2	Evoluce 3D tiskáren RepRap: Darwin, Mendel v2, Morgan, Ormerod 2, Fisher Delta, Prusa i3 Mk2 [6].	18
3	Zleva Skirt, Brim a Raft [22].	23
4	Zleva: Drť po průchodu skartovačem papíru, po úpravě skartovače tak, aby procházel pouze krajem a drť zpracována drtičem větví [33].	28
5	Zleva: Andy's Machine shredder [34] 233 €, Precious plastic Basic Shredder [35] 1000 € , ShredIT [36] 3000 €.	29
6	Jedno hřídelová a dvouhřídelová varianta [27].	29
7	Zleva: vstupní materiál, bez sítka, se sítkem s dírami o \varnothing 10 mm, se sítkem s dírami o \varnothing 5 mm [27].	29
8	Schéma jednošnekového extruderu [37].	31
9	Obecný vztah mezi Youngovým modulem a teplotou [37].	31
10	Znázornění uspořádání řetězců polymerů během vzniku otoku za tryskou [38].	32
11	Linka pro výrobu filamentu od firmy BOCO Pardubice [39].	33
12	Komerční extrudery.	33
13	Čelní pohled na precision 450.	34
14	Kompletní set Filabot EX6.	35
15	Evoluce extruderů od H. Lymana [46, 47].	36
16	RepRap Recyclebot [48].	38
17	FelFil extruder [49].	38
18	Tisk materiálu ULTEM s různým obsahem vody [50].	38
19	Čtyři způsoby utrácení peněz dle Milтона Friedmana.	41
20	Tryskové topné těleso s mosazným pláštěm [53].	42
21	Hadovitý vrták do dřeva.	43
22	Sítka.	44
23	Vlevo řez hotendem, vpravo záběr z termokamery na chladič	44
24	První varianta zařízení, vlevo detail navíječe, vpravo detail extruderu.	45
25	Vlevo druhá varianta, nahoře detail nuceného chodu a dole kompenzátoru. Vpravo finální varianta návrhu, vpravo detail na senzor filamentu.	46
26	Vyrobené varianty kompenzátoru.	46
27	Finální varianta návrhu navíječe, nahoře detail na spojku průvlaku, dole na převodovku pohonu cívky.	48

28	Řez tělem senzoru průměru filamentu.	48
29	Kalibrace senzoru průměru filamentu.	49
30	Schéma zapojení Arduina MEGA.	50
31	Schéma zapojení Arduina UNO.	51
32	Vlevo nahoře zničená izolace pro dřevostavby. Zbylé jsou izolace pro kamna.	53
33	Čelní a zadní strana ovládacího panelu se zapojenými kabely.	53
34	Finální podoba stroje.	56
35	Vlevo upravená sušička na ovoce, vpravo nahoře první 1kg návin, dole běžný testovací.	57
36	Zleva nevysušený filament, filament po hodině sušení na 75 °C, po 3 hodinách, po 5 hodinách sušení a test barvení vyráběné struny pomocí nastříhaného komerčního filamentu.	57
37	Modře je zaznačena aktuální teplota, oranžově nastavená teplota. Na horní polovině je překmit po náběhu systému a následné ustálení. Dole je vidět ustálení po malé změně nastavené teploty.	58
38	Zeleně je zaznačen průměr filamentu, černě spodní hranice rozsahu snímání. Je patrné provázání změny teploty a průměru. Jsou vyznačeny oblasti ustálení, kmitů a jejich časový posun.	58
39	První testovací tisky z úspěšně vyrobeného kusu bez kovových třísek.	59
40	Postupný vývoj dokončení vázy, úplně vlevo vepředu je stejný váleček jako na předchozím obrázku. Dokončená váza vlevo vzadu má rozměry 160 × 160 × 150 mm a bylo na ni použito 115 gramů filamentu.	59
41	Vlevo je graf ekonomické rozvahy pro nákupu a výroby, vpravo nákupu a recyklace.	66

9 SEZNAM TABULEK

1	Vlastnosti vybraných drtičů.	30
2	Parametry extruderů	34
3	Přehled změn mezi jednotlivými evolucemi	37
4	Cena dílů	61
5	Cena dílů, pokračování	62
6	Cena dílů, pokračování	63

7 SEZNAM PŘÍLOH

A	Výkres HotEnd	83
B	Kód Arduino MEGA.....	85
C	Kód Arduino UNO.....	95

A Výkres HotEnd

1

2

3

4

A

B

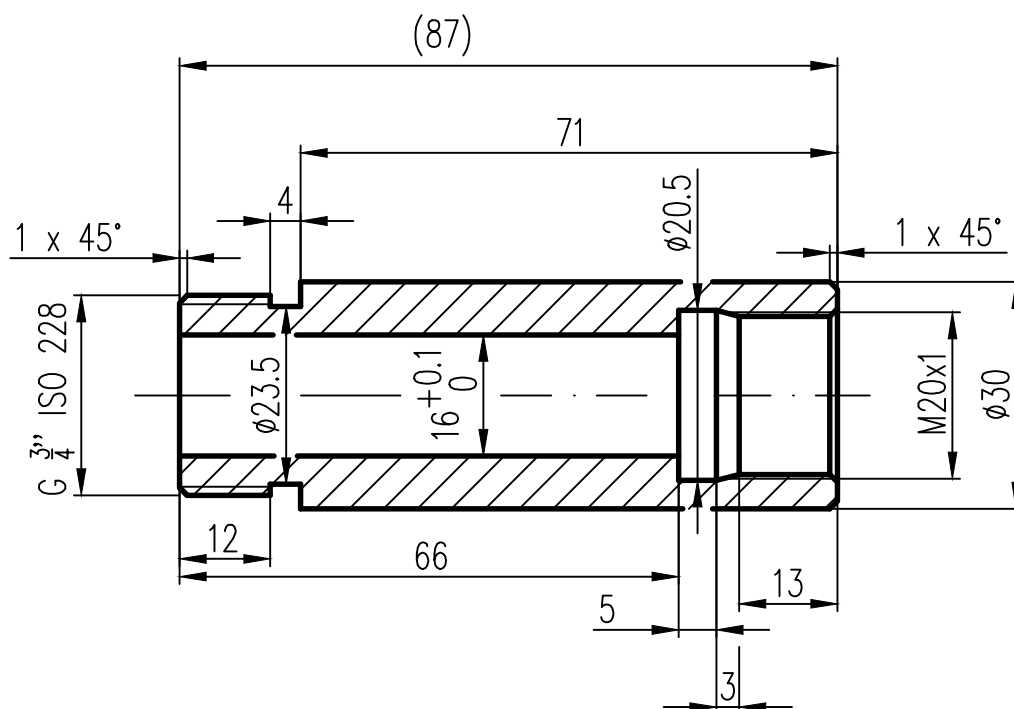
VYTVOŘENO VE STUDENTSKÉ VERZI PRODUKTU AUTODESK

C

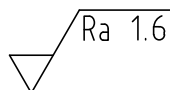
D

E

F



Struktura povrchu:



Hrany:

Měřítko

1:1

Přesnost ISO2768-mH

Tolerování ISO8015

Promítání



Materiál

Polotovár

Hmotnost

kg

CHRÁNĚNO PODLE ISO 16016

dokumentu

Druh

VÝKRES SOUČÁSTI

Název

HotEnd

Kreslil

TATÝREK

Schválil

Číslo dokumentu

Datum vydání

25.03.2021

List /

B Kód Arduino MEGA

```
#include <TM1637Display.h>
#include <PID_v2.h>
#include <max6675.h>
#include <Keypad.h>
#include <LiquidCrystal.h>
#include "MegunoLink.h"
TimePlot MyPlot;
int defSetTemp = 175;
double Setpoint, Input, Output;
int SetTemp = defSetTemp;
double Kp = 110, Ki = 1, Kd = 1000;
PID_v2 myPID(Kp, Ki, Kd, PID::Direct);

int WindowSize = 2500;
unsigned long windowStartTime;

int pinSO = 3;
int pinCS = 4;
int pinSCK = 5;
MAX6675 termoclanek(pinSCK, pinCS, pinSO);
unsigned long startMillisTemp;
unsigned long currentMillis;

int period = 230;

//pin SSR
int pinSSR = 13;
int setTEMP;

//Display teplota SET
int CLKset = 31;
int DIOset = 33;
```

```
TM1637Display displaySet(CLKset, DIOset);
```

```
const uint8_t SEG_SET[] = {  
    SEG_A | SEG_F | SEG_G | SEG_C | SEG_D, // S  
    SEG_A | SEG_D | SEG_E | SEG_F | SEG_G, // E  
    SEG_F | SEG_G | SEG_E | SEG_D, // t  
    SEG_D  
};
```

```
const uint8_t SEG_Err[] = {  
    SEG_A | SEG_D | SEG_E | SEG_F | SEG_G, // E  
    SEG_E | SEG_G, // r  
    SEG_E | SEG_G, // r  
    SEG_D  
};
```

```
//Display teplota aktualni
```

```
int CLKakt = 37;
```

```
int DIOakt = 39;
```

```
TM1637Display displayAkt(CLKakt, DIOakt);
```

```
const int pocetVzorku = 16;
```

```
float vzorky[pocetVzorku];
```

```
int nactiVzorek = 0;
```

```
double total = 0;
```

```
double prumernaTeplota = 0;
```

```
double teplotaC;
```

```
//Klavesnice
```

```
String numSet;
```

```
int cislo;
```

```
bool setNew = 0;
```

```

const byte radky = 4;
const byte sloupce = 4;
// Definování klávesnice
char klavesy[radky][sloupce] = {
    {'1', '2', '3', 'A'},
    {'4', '5', '6', 'B'},
    {'7', '8', '9', 'C'},
    {'*', '0', '#', 'D'}
};

byte pinyRadky[radky] = { 52, 50, 48, 46 };

byte pinySloupce[sloupce] = { 44, 42, 40, 38 };

Keypad klavesnice = Keypad( makeKeymap(klavesy), pinyRadky, pinySloupce, radky, sloupce );

//LCD display
const int rs = 51, en = 49, d4 = 47 , d5 = 45, d6 = 43, d7 = 41;
LiquidCrystal lcd(rs, en, d4, d5, d6, d7);

//Senzor prumeru
int y0;
int y1;
int x0;
int x1;
int koef;
unsigned long startMillisPrumer;
int pinPrumer = A1;
const int pocetVzorkuPrumer = 8;
float vzorkyPrumer[pocetVzorkuPrumer];
int nactiVzorekPrumer = 0;
double totalPrumer = 0;

```

```
double prumernyPrumer = 0;
```

```
void setup() {
```

```
    Serial.begin(9600);
```

```
    displaySet.setBrightness(1);
```

```
    displayAkt.setBrightness(1);
```

```
    displaySet.showNumberDec(SetTemp, false);
```

```
    lcd.begin(16, 2);
```

```
    lcd.print("prumer filamentu:");
```

```
    pinMode(pinSSR, OUTPUT);
```

```
    windowStartTime = millis();
```

```
    myPID.SetOutputLimits(0, WindowSize);
```

```
    myPID.Start(termoclanek.readCelsius(), // input
```

```
        0,          // current output
```

```
        SetTemp);
```

```
    startMillisTemp = millis();
```

```
    startMillisPrumer = millis();
```

```
    for (int thisReading = 0; thisReading < pocetVzorku; thisReading++)
```

```
    {
```

```
        vzorky[thisReading] = 0;
```

```
    }
```

```
    for (int thisReading = 0; thisReading < pocetVzorkuPrumer; thisReading++)
```

```
    {
```

```
        vzorkyPrumer[thisReading] = 0;
```

```
    }
```

```
    //Senzor prumeru
```

```
    y0 = 15500;
```

```
y1 = 18500;  
x0 = 223;  
x1 = 327;  
koef = ((y1 - y0) / (x1 - x0));
```

```
}
```

```
void loop() {  
    currentMillis = millis();  
    char key = klavesnice.getKey();  
    if (key && setNew == 0)  
    {  
        switch (key)  
        {  
            case '*':  
                displaySet.setSegments(SEG_SET);  
                setNew = 1;  
                numSet = "";  
                break;  
  
            case 'D':  
                numSet = "";  
                setNew = 0;  
                displaySet.showNumberDec(SetTemp, false);  
                break;  
            default:  
                break;  
        }  
    }  
    else if (key && setNew == 1)
```

```

{
switch (key)
{
case 'A':
    if (cislo > 149 && cislo < 251)
    {
        SetTemp = cislo;
        myPID.Start(prumernaTeplota, // input
                    0,                // current output
                    SetTemp);
        setNew = 0;
        displaySet.showNumberDec(SetTemp, false);
    }
    else
    {
        displaySet.setSegments(SEG_Err);
    }
    break;

case 'D':
    numSet = "";
    setNew = 0;
    displaySet.showNumberDec(SetTemp, false);
    break;

case 'B':
    break;
case 'C':
    break;
case '*':
    break;
case '#':
    break;

```

```

default:
    numSet += key;
    cislo = numSet.toInt();
    displaySet.showNumberDec(cislo, false);
    break;
}

}

```

```

if (currentMillis - startMillisPrumer >= 330)
{
    int x = analogRead(pinPrumer);
    int y = (y0 + (x - x0) * koef) / 100;
    totalPrumer -= vzorkyPrumer[nactiVzorekPrumer];
    vzorkyPrumer[nactiVzorekPrumer] = y;
    totalPrumer += vzorkyPrumer[nactiVzorekPrumer];
    nactiVzorekPrumer++;
    if (nactiVzorekPrumer >= pocetVzorkuPrumer)
    {
        nactiVzorekPrumer = 0;
    }
    prumernyPrumer = (totalPrumer / (double)pocetVzorkuPrumer);
    startMillisPrumer = currentMillis;
    MyPlot.SendData("PrumerAVG", prumernyPrumer);
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print(prumernyPrumer);
}

```

```

if (currentMillis - startMillisTemp >= period)
{
    total -= vzorky[nactiVzorek];
    teplotaC = termoclanek.readCelsius();
}

```



```

startMillisTemp = currentMillis;

vzorky[nactiVzorek] = teplotaC;
total += vzorky[nactiVzorek];
nactiVzorek++;
if (nactiVzorek >= pocetVzorku)
{
    nactiVzorek = 0;
}
prumernaTeplota = (total / (double)pocetVzorku);
MyPlot.SendData("TeplotaAVG", prumernaTeplota);
displayAkt.showNumberDec(prumernaTeplota, false);
MyPlot.SendData("TeplotaSET", SetTemp);
}

```

```

//Serial.println(prumernaTeplota);
const double input = prumernaTeplota;
const double output = myPID.Run(input);
while (millis() - windowStartTime > WindowSize) {
    windowStartTime += WindowSize;
}
if (output < millis() - windowStartTime)
    digitalWrite(pinSSR, LOW);
else
    digitalWrite(pinSSR, HIGH);
if (prumernaTeplota < 10)
    digitalWrite(pinSSR, LOW);
}

```


C Kód Arduino UNO

```
int rychlostCivky = 400;
unsigned long startMillis;
unsigned long currentMillis;
```

```
const int SenzorPruvlakuHorni = 10;
const int SenzorPruvlakuDolni = 11;
const int SenzorFilamentuHorni = 12;
const int SenzorFilamentuDolni = 13;
int dist;
bool NavijeniAktivni = 0;
```

```
#include <AccelStepper.h>
#define motorInterfaceType 1
```

```
const int DirCivka = 7; //civka
const int StepCivka = 6;
```

```
const int DirPruvlak = 9; //pruvlak
const int StepPruvlak = 8;
```

```
AccelStepper StepperCivka = AccelStepper(motorInterfaceType, StepCivka, DirCivka);
AccelStepper StepperPruvlak = AccelStepper(motorInterfaceType, StepPruvlak, DirPruvlak);
```

```
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(DirCivka, OUTPUT);
  pinMode(StepCivka, OUTPUT);
  pinMode(DirPruvlak, OUTPUT);
  pinMode(StepPruvlak, OUTPUT);

  pinMode(SenzorPruvlakuHorni, INPUT);
  pinMode(SenzorPruvlakuDolni, INPUT);
```

```
pinMode(SenzorFilamentuHorni, INPUT);  
pinMode(SenzorFilamentuDolni, INPUT);
```

```
digitalWrite(DirCivka, HIGH);  
digitalWrite(StepCivka, LOW);  
digitalWrite(DirPruvlak, HIGH);  
digitalWrite(StepPruvlak, LOW);  
digitalWrite(DirPruvlak, HIGH);  
digitalWrite(StepPruvlak, LOW);
```

```
StepperCivka.setMaxSpeed(1000);  
StepperPruvlak.setMaxSpeed(1000);  
StepperCivka.setSpeed(rychlostCivky);  
StepperPruvlak.setSpeed(-400);
```

```
StepperCivka.setAcceleration(500.0);  
StepperPruvlak.setAcceleration(1000.0);  
StepperPruvlak.setAcceleration(500.0);  
dist = 88*16;  
StepperPruvlak.move(0);  
delay(1000);
```

```
}
```

```
void loop() {
```

```
if (digitalRead(SenzorFilamentuDolni) == HIGH){  
    NavijeniAktivni = 1;  
    startMillis=millis();  
}
```

```
while (NavijeniAktivni==1)  
{
```

```
StepperCivka.setSpeed(rychlostCivky);
```

```
StepperCivka.runSpeed();//civka
```

```
StepperPruvlak.run();//pruvlak
```

```
if( StepperCivka.currentPosition() == 400*16)
```

```
{
```

```
  StepperCivka.setCurrentPosition(0);
```

```
  StepperPruvlak.move(dist);
```

```
}
```

```
if (digitalRead(SenzorFilamentuHorni) == HIGH)
```

```
{
```

```
  currentMillis=millis();
```

```
  if(currentMillis - startMillis>= 60000)
```

```
  {
```

```
    if (rychlostCivky < 800)
```

```
    {
```

```
      rychlostCivky+=10;
```

```
    }
```

```
  }
```

```
  else if(currentMillis - startMillis<= 30000)
```

```
  {
```

```
    if (rychlostCivky > 200)
```

```
    {
```

```
      rychlostCivky-=10;
```

```
    }
```

```
  }
```

```
  NavijeniAktivni = 0;
```

```
}
```

```
if (digitalRead(SenzorPruvlakuHorni) == HIGH){
```

```
dist = 88*16;
```

```
}
```

```
if (digitalRead(SenzorPruvlakuDolni) == HIGH){
```

```
dist = -88*16;
```

```
}
```

```
}
```

```
}
```